

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

**Vlastnosti svarových spojů hliníkových slitin provedených metodami
tavného a tlakového svařování**

**Properties of Weld Joints of Aluminium Alloy Performed by Fusion
and Pressure Welding**

Student:

Bc. Marek Vícha

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

Ostrava 2014

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marek Vícha**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Vlastnosti svarových spojů hliníkových slitin provedených metodami
tavného a tlakového svařování**
**Properties of Weld Joints of Aluminium Alloy Performed by Fusion and
Pressure Welding**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rozbor hliníkových slitin.
2. Proveďte hodnocení svařitelnosti vytvrditelných hliníkových slitin.
3. Navrhněte vhodné metody tavného a tlakového svařování vytvrditelných hliníkových slitin.
4. Navrhněte metodiku ověření vlastností svarových spojů hliníkových slitin.
5. Bod 4 realizujte.
6. Proveďte diskuzi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I: Učební texty*. 1. vydání. VŠB-TU Ostrava. 2005. 133 s. ISBN 80-248-0870-6
KOUKAL, J., SCHWARZ, D., HAJDÍK, J. *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty*. 1. vydání. VŠB-TU Ostrava. 2009. 240 s. ISBN 978-80-248-2025-5
HRIVNÁK, I. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. 1. vydání. VSAV Bratislava. 1989. 344 s. ISBN 80-224-0016-5
ČSN EN ISO 15614-1 *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupů svařování - Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Praha: Český normalizační institut, 2005
TURNÁ, M. *Speciální metody zvarování*. Alfa, Bratislava, 1989
Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení*. ZEROSS, Ostrava, 2001
Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost*. ZEROSS, Ostrava, 1999
ORSZÁGH, V., ORSZÁGH, P. *Zváranie TIG ocelí a neželezných kovů*. SAV, Bratislava, 1998.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



Ing. Petr Mohyla, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval doc. Ing. Drahomíru Schwarzovi, CSc. za jeho cenné rady, připomínky a informace při zpracovávání této diplomové práce.

Rovněž bych chtěl poděkovat za spolupráci firmě BZS MACHINERY, spol. s.r.o., jmenovitě panu Petru Nezdařilovi a panu Miroslavu Čeganovi. Dále pak panu Ing. Peteru Zifčákovi z Výskumného ústavu zvaračského za vedení a praktické rady při svařování metodou FSW a také panu Luděkovi Štalmachovi za pomoc při realizaci zkoušek svarových spojů.

V neposlední řadě patří poděkování také mé rodině.

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 10.5.2014

Maruk Tichav
.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3.).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 10.5.2014

Marek Vícha

.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Marek Vícha

Adresa trvalého pobytu autora práce: Sládkova 2988/27a, 702 00, Ostrava

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VÍCHA, M. *Vlastnosti svarových spojů hliníkových slitin provedených metodami tavného a tlakového svařování : diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2014, 86 s. Vedoucí práce: Schwarz, D.

Diplomová práce se zabývá vlivem tavného a tlakového svařování na výsledné vlastnosti hliníkových slitin. Pro praktickou realizaci byla zvolena vytvrditelná hliníková slitina EN AW 6082. Svary byly provedeny jak tavnými metodami TIG 141 a MIG 131, tak i tlakovým svařováním metodou FSW. V úvodu práce je obecně pojednáno o hliníku a jeho slitinách. Dále je zde nastíněna problematika svařování těchto materiálů s uvedením vhodných svařovacích metod. V experimentální části práce je proveden rozbor daného základního a přídatného materiálu a popsána metodika svařování. Práce pokračuje zkouškami zkušebních dílů a jejich vyhodnocením. V závěru je provedena diskuse a zhodnocení výsledků.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

VÍCHA, M. *Properties of Weld Joints of Aluminium Alloy Performed by Fusion and Pressure Welding : Master Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2014, 86 p. Thesis head: Schwarz, D.

This Master's thesis is concerned with the effect of fusion and pressure welding on the final properties of aluminium alloys. It used hardenable aluminium alloy EN AW 6082. Experimental welds were provided by fusion methods TIG 141 and MIG 131 as well as the pressure method FSW. The first part of this work describes aluminium and its alloys including weldability and suitable welding methods. An analysis of the parental and filler materials and welding methodology was carried out in the second experimental part. This is followed with tests of trial pieces and their evaluation. The Master's thesis is completed with a discussion of the results and their evaluation.

OBSAH

Seznam použitých značek a symbolů	9
Úvod.....	10
1 Hliník a jeho slitiny, rozdělení a charakteristika [14].....	11
1.1 Vlastnosti čistého hliníku a jeho výroba.....	11
1.1.1 Průmyslová výroba hliníku a jeho výskyt v přírodě.....	11
1.1.2 Fyzikální vlastnosti hliníku.....	12
1.2 Hliníkové slitiny	13
1.2.1 Základní pojmy a rozpustnost legur.....	14
1.2.2 Legující prvky a jejich vliv na vlastnosti slitiny [12] [15]	15
1.3 Označování hliníku a hliníkových slitin	16
1.3.1 Značení podle ČSN 42 0055.....	17
1.3.2 Označování hliníku a hliníkových slitin podle ČSN EN 573	17
1.3.3 Označování hliníku a hliníkových slitin podle ČSN EN 1780	18
1.4 Tepelné zpracování	19
1.4.1 Žíhání	20
1.4.2 Vytvrzování – precipitační zpevnění	21
2 Svařitelnost hliníku a jeho slitin [14].....	23
2.1 Pórovitost svarů	24
2.2 Povrchové oxidy	25
2.3 Trhliny	26
2.4 Pokles pevnosti a tvrdosti vytvrzených hliníkových slitin	28
3 Metody svařování hliníku a jeho slitin [14].....	29
3.1 Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou.....	29
3.1.1 Princip metody	30
3.1.2 Použití při svařování hliníku a jeho slitin	30
3.2 Obloukové svařování v ochranných atmosférách.....	32
3.2.1 Inertní plyny.....	32
3.2.2 Metoda TIG 141.....	33
3.2.2.1 Princip metody	33
3.2.2.2 Použití při svařování hliníku a jeho slitin	35
3.2.3 Metoda MIG 131	36
3.2.3.1 Princip metody	36
3.2.3.2 Použití při svařování hliníku a jeho slitin	37
3.3 Vysokoenergetické metody tavného svařování	38
3.3.1 Plazmové svařování	38
3.3.2 Elektronové svařování	39
3.3.3 Laserové svařování [29] [3].....	39
3.4 Odporové svařování [3]	40
3.5 Speciální metody tlakového svařování	41

3.5.1	Difúzní svařování.....	41
3.5.2	Tlakem za studena	42
3.5.3	Ultrazvuk	42
3.6	Friction stir welding.....	43
3.6.1	Princip metody	43
3.6.2	Svařovací nástroj a průřez svarem	45
3.6.3	Použití metody FSW z hlediska materiálů.....	46
3.6.4	Výhody a nevýhody metody FSW [43] [44]	47
3.7	Návrh vhodných metod tavného a tlakového svařování.....	48
4	Ověřování vlastností svarových spojů	49
5	Experimentální část.....	50
5.1	Základní materiál a jeho charakteristika	50
5.2	Tavné svařování slitiny EN AW 6082.....	51
5.2.1	Charakteristika přídavného materiálu	51
5.2.2	Příprava dílců ke svařování.....	52
5.2.3	Svařování TIG.....	53
5.2.4	Svařování MIG	54
5.2.5	Tepelné zpracování	55
5.3	Tlakové svařování slitiny EN AW 6082 metodou FSW.....	57
5.3.1	FSW - příprava dílů a základní údaje	57
5.3.2	FSW - parametry svařování	58
5.3.3	FSW - jednotlivé vzorky.....	59
6	Zkoušky svarových spojů a dosažené výsledky	61
6.1	Vizuální kontrola svarů (VT).....	61
6.2	Kapilární zkouška (PT)	63
6.3	Radiografická kontrola (RT).....	64
6.4	Makroskopická a mikroskopická kontrola svarových spojů.....	65
6.5	Měření mikrotvrdosti	69
6.6	Příčná zkouška tahem	71
6.7	Zhodnocení dosažených výsledků	73
	Závěr.....	77
	Použitá literatura	79
	Seznam tabulek	83
	Seznam obrázků.....	84
	Přílohy.....	86

Seznam použitých značek a symbolů

111	ruční obloukové svařování obalenou elektrodou
AC	střídavý proud
Al	hliník
Ar	argon
A/mm ²	ampér na milimetr čtvereční, jednotka proudového zatížení
CWS ANB	Česká svářečská společnost ANB
DC	stejnoseměrný proud
FSW	friction stir welding
GP1	Guinier-Prestonovy zóny – první typ
GP2	Guinier-Prestonovy zóny – druhý typ
GPa	gigapascal
He	hélium
Hz	hertz
MAG 135	obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu
MIG 131	obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu
MPa	megapascal
NDT	nedestruktivní zkoušení
O ₂	kyslík
PM	přídavný materiál
Rm	mez pevnosti
SK	svarový kov
TIG 141	obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu
TOO	tepelně ovlivněná oblast
W	watt
WPS	specifikace postupu svařování
ZM	základní materiál
eV	elektronvolt
lx	lux, jednotka intenzity osvětlení
μm	mikrometr
s	sekunda

Úvod

Výroba a využívání hliníku a jeho slitin ve světě prakticky nepřetržitě roste. To s sebou pochopitelně přináší i rostoucí požadavky na svařování těchto materiálů a to jak z hlediska kvantitativního, tak i z hlediska vývoje nových metod svařování a zdokonalování metod stávajících. Hliník je po oceli druhý nejpoužívanější kovový materiál a to nejen ve svařování. Pro svařování hliníku existuje mnoho použitelných metod, ať už tavných nebo tlakových.

Tato diplomová práce se zabývá svařováním hliníku a jeho slitin. Zvláštní pozornost je věnována vytvrditelným hliníkovým slitinám. Konkrétně se jedná o řadu 6000 a jejího zástupce slitinu EN AW 6082, která je v praxi poměrně hojně využívána. Diplomová práce svým zaměřením navazuje na bakalářskou práci „Vliv technologie svařování 141 a 131 na výsledné vlastnosti svarového spoje slitiny EN AW 6082“ [14]. V původní práci byl ověřen předpoklad prudkého poklesu pevnostních charakteristik při svařování této slitiny nejpoužívanějšími tavnými metodami. Primárním cílem této práce je návrh, provedení a ověření takových postupů, které by tento nežádoucí jev eliminovaly nebo výrazně potlačily. Jednou možností je materiál po svaření tepelně zpracovat. Druhým směrem, pro tuto práci stěžejním, je využití tlakových metod svařování, konkrétně pak metody FSW. Tato perspektivní metoda je v současnosti stále předmětem dalšího výzkumu a nabývá na významu.

V úvodní kapitole je pojednáno o hliníku a jeho slitinách. Jedná se zejména o rozbor jejich mechanických, chemických a fyzikálních vlastností. Samostatné kapitoly jsou věnovány svařitelnosti hliníkových materiálů a metodám, které se pro jejich svařování používají. Zvláštní pozornost je upřena na poměrně mladou a dynamicky se rozvíjející metodu tlakového svařování FSW. Praktická část práce je zaměřena na konkrétní vytvrditelnou slitinu EN AW 6082. Tavné svařování proběhlo ve firmě BZS MACHINERY, spol. s.r.o. U těchto svarů bylo navíc provedeno tepelné zpracování po svaření. Tlakové svařování se realizovalo ve Výzkumném ústavu zvaračském v Bratislavě. Na svařených dílcích byly poté provedeny potřebné zkoušky. Jmenovitě se jedná o zkoušky vizuální, penetrační, radiografickou, metalografickou, měření mikrotvrdosti a příčnou zkoušku tahem. Dosažené výsledky a jejich zhodnocení jsou uvedeny v závěru.

1 Hliník a jeho slitiny, rozdělení a charakteristika [14]

Hliníkové konstrukční materiály se rozdělují do dvou základních skupin. Rozhodujícím kritériem je procentuální obsah hliníku v daném materiálu.

- technický hliník (obsah Al je minimálně 99 %)
- hliníkové slitiny (celkový obsah legur je větší než 1 %, zbytek je Al)

1.1 Vlastnosti čistého hliníku a jeho výroba

1.1.1 Průmyslová výroba hliníku a jeho výskyt v přírodě

Hliník je třetím nejrozšířenějším prvkem zemské kůry, dle odhadů je ho zde okolo 7,5 - 8,5 %. To z něj činí nejrozšířenější kov na Zemi. Přesto však v průmyslovém měřítku začala jeho výroba až v roce 1859. To bylo dáno zejména tím, že se v čisté formě v přírodě nevyskytuje a vhodné technologie pro jeho výrobu dosud nebyly známy. V přírodě je vázán ve sloučeninách, z nichž nejznámější jsou bauxit, kryolit a velmi tvrdý minerál korund (Al_2O_3). [11] [15]

Technicky čistý hliník se vyrábí z bauxitu ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ – dihydrát oxidu hlinitého) a kryolitu ($\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$ – hexafluorohlinitan sodný) elektrolýzou jejich taveniny. Elektrolýzou lze vyrobit hliník o čistotě 99,3 až 99,8 %. Čistota takto vyrobeného hliníku závisí na podmínkách elektrolýzy a na čistotě vstupních surovin. Mezi hlavní nečistoty patří zejména železo, křemík a měď. Hliník vyšší čistoty se vyrábí rafinací elektrolytického hliníku, pak je možno dosáhnout velmi vysoké čistoty překračující 99,99 %. Výroba hliníku je náročná nejen energeticky, ale i z hlediska ekologie. Na výrobu jedné tuny hliníku se vyprodukuje až 0,5 tuny toxického odpadu. Výroba je také náročná na spotřebu vody. V současné době je hlavním světovým producentem hliníkových materiálů Čína. Další významnou možností výroby hliníku je zpracování druhotných surovin. Tento způsob výroby je podstatně méně nákladný a také šetrnější k přírodě, než výroba z bauxitu. [6] [8] [7]

1.1.2 Fyzikální vlastnosti hliníku

Hliník řadíme mezi lehké kovy, má typickou bělavě šedou barvu způsobenou povrchovou vrstvičkou Al_2O_3 . Hliník je za pokojové teploty pevná krystalická látka. Atomy hliníku krystalizují v plošně středěné kubické soustavě, z čehož vyplývají některé jeho vlastnosti, jako je například jeho velmi dobrá tažnost za tepla i za studena. Hliník má velmi malou měrnou hmotnost, její velikost 2700 kg/m^3 jej řadí mezi lehké kovy. Dalšími podstatnými vlastnostmi hliníku ovlivňujícími technologii svařování je jeho dobrá elektrická a tepelná vodivost. Pro zajímavost zde uvádím i použití hliníku při aluminotermickém svařování, které je umožněno díky jeho vysoké hodnotě spalného tepla.

Velmi významná je rovněž odolnost proti korozi, ta je způsobena tenkou vrstvou (uvádí se cca 5 - 20 nm) Al_2O_3 vytvářející na povrchu hliníku film, který brání další korozi. Tato vrstva se někdy uměle zvyšuje oxidací za účelem zlepšení korozivzdornosti (eloxace) až na 25 μm . Oxid hlinitý je velmi tvrdý, oproti čistému Al má nižší tepelnou a elektrickou vodivost, což způsobuje problémy při svařování. Komplikace způsobuje rovněž značný rozdíl v teplotách tavení oxidu a čistého hliníku. Teplota tavení oxidu je 2050 °C, čistého hliníku pak 658 °C.

Pevnost v tahu hliníku Al 99,5 % je zhruba 70 MPa. Se stoupajícím obsahem nečistot pevnost a tvrdost hliníku roste. Naopak klesá jak tažnost, tak i elektrická a tepelná vodivost. Za nečistoty v technicky čistém hliníku se považují zejména železo a křemík. Jedná se o příměsi, které se do hliníku dostanou buď v průběhu výroby nebo se je naopak nepodaří zcela odstranit z výchozích surovin. Pevnost je možno dále zvýšit tvářením za studena, legováním nebo tepelným zpracováním (vytvrditelné slitiny hliníku). Naopak při vzrůstající čistotě hliníku jeho pevnost klesá a tažnost stoupá. Pro hliník o čistotě 99,99 % v žíhaném stavu se uvádí $R_m = 40$ až 50 MPa, pro hliník čistoty 99,7 % je $R_m = 60$ MPa. Přehled základních mechanických a fyzikálních vlastností je uveden v tabulce. [6] [4] [7] [12] [24]

Tabulka 1: Mechanické a fyzikální vlastnosti hliníku Al 99,5 % [2] [8] [6] [4] [15]

VELIČINA/VLASTNOST	JEDNOTKA	ČISTÝ HLINÍK
Protonové číslo		13
Elektronová konfigurace		[Ne] 3s ² 3p ¹
Měrná hmotnost při 20°C	[kg·m ³]	2 700
Teplota tavení	[°C]	658
Teplota varu	[°C]	2 270
Součinitel tepelné vodivosti	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	234
Součinitel teplotní roztažnosti	[K ⁻¹]	24,7·10 ⁶
Elektrická vodivost při 20°C	[S]	35
Pevnost v tahu	[MPa]	70
Tažnost	[%]	30 – 40
Tvrdost	[HB]	20
Spalné teplo	[MJ·kg ⁻¹]	31,05
Modul pružnosti v tahu	[Gpa]	72/67 [4]

Technický hliník se dle jeho čistoty rozděluje do následujících skupin: [4]

- elektrovodný hliník má čistotu 99,85 % a vyšší (obsah nečistot maximálně 0,15 %)
- hliník pro potravinářství a chemický průmysl obsahuje maximálně 0,2 % nečistot
- hliník pro speciální účely má obsah nečistot maximálně 0,25 %
- hliník běžné jakosti má obsah nečistot maximálně 0,5 %

1.2 Hliníkové slitiny

Nalegováním jednoho nebo více prvků k hliníku vznikají hliníkové slitiny. Použitím vhodných legur je možno docílit zlepšení mechanických, chemických či technologických vlastností materiálu. Pevnostní vlastnosti, které stojí v technickém využití hliníku v popředí, lze například zvýšit přidávkou Cu nebo Mg. Dobrých slévárenských vlastností siluminů je zas dosaženo legováním Si. Slitiny hliníku je možno dělit podle různých kritérií, jsou to primárně: [4] [6] [15]

- chemické složení
- odolnost proti korozi

- způsob zpracování (tvářené slitiny a slitiny na odlitky)
- tepelné zpracování (tepelně vytvrditelné a tepelně nevytvrditelné)

1.2.1 Základní pojmy a rozpustnost legur

Chemicky čistý kov obsahuje pouze jeden druh atomů bez příměsí jiných prvků.

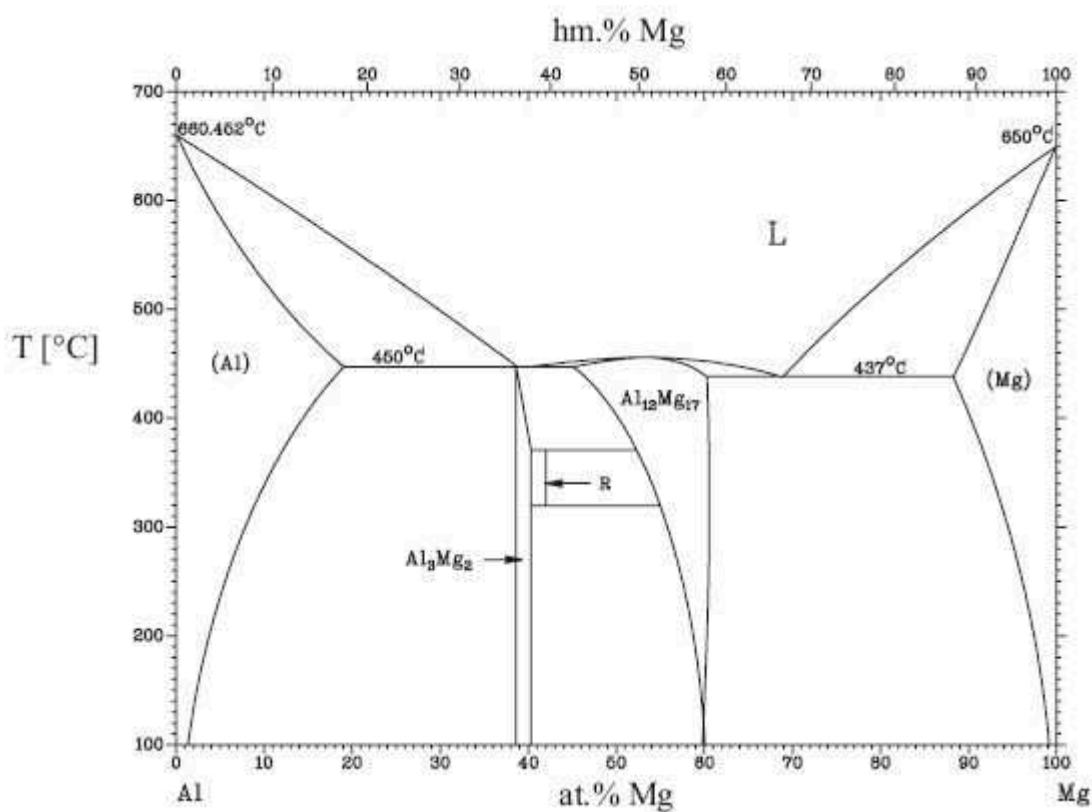
Technicky čistý kov je materiál o vysoké čistotě. Základní prvek je zde zastoupen v míře přesahující 99 % všech atomů. Hliník se považuje za technicky čistý, je-li v materiálu obsaženo minimálně 99 % Al. Naproti tomu u mědi je to 99,5 % Cu. [4]

Slitinou je nazývána směs dvou a více chemických prvků, z nichž bývá obvykle jeden základní. Slitiny pak mohou dostat název podle tohoto základního prvku nebo mít své vlastní originální pojmenování např.: slitina hliníku, slitina titanu, ocel, mosaz, dural, silumin, hydronalium apod. Slitiny se nejčastěji vyskytují ve formě tuhých roztoků. [4]

Rozpustnost přísad není obecně stejná. Záleží na tom, o jakou přísadu se jedná, dále na základním prvku a na teplotě. Rozpustnost se dělí na:

- úplnou – prvky se mísí ve všech koncentracích (Cu-Ni)
- částečnou – prvky se mísí jen omezeně do určité koncentrace (Al-Cu), nazývané **mez rozpustnosti**
- žádnou – prvky se nemísí (např. S, P v ocelích) [4] [2]

Hliníkové slitiny jsou převážně nízkolegované. Rozpustnost roste s teplotou a naopak. Pro každou slitinu byl vytvořen její vlastní diagram, ze kterého se dají tyto zákonitosti odečíst. Rozpustnost kovů v hliníku je vždy částečná. Nejvyšší rozpustnost vykazuje zinek a to až 67 % při teplotě 381 °C. Ukázka částečné rozpustnosti legujícího prvku v hliníku je na obrázku 1. Jedná se o binární diagram Al-Mg. Maximální rozpustnost hořčíku v hliníku je 17,4 % při teplotě 450 °C. Tyto fázové diagramy mají velký praktický význam při procesu vytvrzování. [15]



Obrázek 1: Fázový diagram systému Al – Mg [15]

1.2.2 Legující prvky a jejich vliv na vlastnosti slitiny [12] [15]

Bor se přidává do slitin hliníku z důvodu zjemnění zrna a zvýšení elektrické vodivosti. Přídavek boru bývá velmi malý, max. 0,1 %. Rozpustnost částečná.

Bismut bývá přidáván do slitin hliníku z důvodu zlepšení obrobiteľnosti, jinak není jako legující prvek příliš vhodný.

Chrom se přidává za účelem omezení škodlivého vlivu železa, protože snižuje náchylnost ke zhrubnutí zrna u slitin hliníku s hořčíkem. Rozpustnost chromu v hliníku je poměrně vysoká.

Měď je jedním z hlavních legujících prvků ve slitinách hliníku. Rozpustnost je až 19,7 % při eutektické teplotě. Má zpevňující účinek, snižuje však odolnost proti korozi. V technických slitinách se nejčastěji používá společně s hořčíkem.

Železo se v hliníkových slitinách vyskytuje vždy. Dostává se do nich buď jako nežádoucí prvek při výrobě nebo bývá přidáváno záměrně pro zvýšení pevnosti. Jeho

obsah nebývá vyšší než 1 %. Rozpustnost je velmi malá hluboce pod touto hranicí, v důsledku čehož bývá ve struktuře přítomno hlavně jako intermetalická sloučenina s hliníkem.

Hořčík má maximální rozpustnost v hliníku cca 17,4 % při teplotě 450 °C, ve slitinách pro tváření bývá jeho obsah omezen na max. 7 %. Při vyšším obsahu Mg klesá odolnost proti korozi a také tvárnost. Hořčík výrazně zvyšuje pevnost slitin. Je hlavním legujícím prvkem u slitin řady 5xxx, společně s mědí řady 2xxx a společně s křemíkem pak řady 6xxx, kde se především podílí na zvýšení pevnosti.

Mangan se přidává do slitin tepelně vytvrzovaných i nevytvrzovaných. Obecně zvyšuje pevnost tvářených slitin, může však způsobit i pokles plasticity. Zlepšuje vlastnosti hliníkových slitin tím, že snižuje jejich náchylnost k mezikrystalické korozi a korozi pod napětím. Leguje se rovněž za účelem zjemnění zrna a pro zvýšení citlivosti ke kalení.

Křemík zvyšuje odolnost proti otěru. Ve spojení s minimem přísad (např. Na, Sr) dochází ke zjemnění mikrostruktury a tím ke zlepšení mechanických vlastností. Je hlavní legující prvek slévárenských slitin, tzv. Siluminů. U slitin série 6xxx se podílí na vytvrzení vznikem intermetalické fáze Mg_2Si .

Titan bývá ve slitinách s hliníkem přítomen prakticky vždy, neboť TiO_2 je obsažen v bauxitech. Ve výrobě hliníkových slitin se obvykle používá pro zefektivnění rafinace při lití. Další jeho příznivou vlastností je, že zjemňuje zrno.

Zinek má ze všech prvků vyskytujících se v hliníkových slitinách nejvyšší rozpustnost. Slitiny s obsahem zinku nad 60 % vykazují superplasticitu.

1.3 Označování hliníku a hliníkových slitin

Označování hliníkových materiálů je rozvedeno ve více normách. V praxi má přednost značení podle ČSN EN. Jednotlivé normy a jejich základní parametry jsou uvedeny níže.

1.3.1 Značení podle ČSN 42 0055

V této normě z roku 1977 je rozveden princip číselného označování těžkých a lehkých neželezných kovů. Číselné značení je složeno ze šestimístního základního čísla, za nímž zpravidla následuje dvoumístné číslo doplňkové. [18] [19]

ČSN 42 4203 . XX

- 42 - třída norem (42 značí hutnictví)
- 4 - lehké neželezné kovy (3 označuje těžké)
- 2 - tvářené kovy a slitiny (sudá číslice), slévárenské slitiny (lichá číslice)
- 20 - dvojčíslí složené ze čtvrté a páté číslice určuje skupinu neželezných kovů
- 3 - pořadová číslice
- .XX - doplňkové dvojčíslí za tečkou udává stav, jakost a tepelné zpracování

Kovy s měrnou hmotností do $5 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$ jsou označovány jako lehké, nad tuto hranici jako těžké. [19]

1.3.2 Označování hliníku a hliníkových slitin podle ČSN EN 573

Norma ČSN EN 573 stanovuje označování tvářených hliníkových materiálů, jejich chemické složení a druhy výrobků. Norma se dělí na čtyři části, z nichž nejvýznamnější a nejpoužívanější je část 573-1: číselné označování. Označování chemickými značkami podle části 573-2 je chápáno jako alternativní. [9] [19]

EN AW 6082

- EN - úvodní předpona
- A - značí hliník
- W - tvářené výrobky
- XXXX - čtyři číslice určující chemické složení (viz. dále)

První řada je vyhrazena čistému hliníku, od řady 2000 se jedná o jeho slitiny podle hlavních slitinových prvků.

- řada 1000 - technicky čistý hliník
- řada 2000 - měď
- řada 3000 - mangan
- řada 4000 - křemík
- řada 5000 - hořčík
- řada 6000 - hořčík a křemík
- řada 7000 - zinek
- řada 8000 - jiné prvky
- řada 9000 - neobsazená řada [9]

1.3.3 Označování hliníku a hliníkových slitin podle ČSN EN 1780

Tato norma určuje označování litých hliníkových materiálů. Je rozdělena do tří částí. Nejvíce se využívá část 1780-1: číselné označování. V části 1780-2 je uvedeno označování chemickými značkami, část 2 je opět chápána jako alternativa k číselnému značení. Značení se od předešlé normy příliš neliší. [20]

EN AM – 91400

- EN - úvodní předpona
- A - značí hliník
- M - předslitina, B - ingoty pro přetavení, C - odlitky
- XXXXX - těchto pět číslic určuje mezní hodnoty chemického složení [20]

První z pěti číslic v označení musí určovat hlavní slitinový prvek. [20]

- 2XXXX - měď
- 4XXXX - křemík
- 5XXXX - hořčík
- 7XXXX - zinek

Stručný přehled některých základních hliníkových materiálů a jejich mechanické vlastnosti je uveden v tabulce 2.

Tabulka 2: Značení a pevnost základních hliníkových materiálů [2] [21] [30]

Značení dle			Minimální R _m [MPa] ve stavu	
EN 573-1	EN 573-2	ČSN 42 0055		
Technický hliník			Žíhaném	Vytvrzeném
EN AW 1080	EN AW-Al99,8	ČSN 42 4002	50	100
EN AW 1050	EN AW-Al99,5	ČSN 42 4005	70	130
Slitiny tepelně nezpracovatelné				
EN AW 5019	EN AW-AlMg5	ČSN 42 4415	250	350
EN AW 5251	EN AW-AlMg4,5Mn0,7	ČSN 42 4412	180	270
EN AW 5754	EN AW-AlMg3	ČSN 42 4413	200	300
Slitiny tepelně zpracovatelné				
EN AW 2017	EN AW-AlCu4MgSi	ČSN 42 4201	180-240	380-400
EN AW 2024	EN AW-AlCu4Mg1	ČSN 42 4203	180-240	430-450
EN AW 7020	EN AW-AlZn4,5Mg1	ČSN 42 4441	180-200	300-360
Slitiny slévárenské			Minimální R _m [MPa] ve stavu	
Značení dle				
EN 1780		ČSN 42 0055		
číselné značení	chemické složení		Litém	Vytvrzeném
EN AC 44300	EN AC-AlSi12(Fe)	ČSN 42 4330	170-220	-
EN AC 43000	EN AC-AlSi10Mg	ČSN 42 4331	180	240
EN AC 51400	EN AC-AlMg5(Si)	ČSN 42 4515	160-200	-

1.4 Tepelné zpracování

„Ve smyslu ČSN 42 0056 lze tepelné zpracování hliníku a jeho slitin definovat jako pochod, při kterém jsou výrobek nebo jeho část v tuhém stavu podrobeny jednomu nebo více žíhacím cyklům za účelem dosažení požadované struktury/substruktury a vlastností.“ [15]

Aby bylo dosaženo požadované struktury a vlastností je třeba dodržet rychlost ohřevu a ochlazování a také dobu výdrže na potřebné teplotě. Tepelné zpracování hliníkových slitin pro tváření a pro odlévání se od sebe v zásadě, až na výjimky, příliš neliší. Všechny způsoby tepelného zpracování se proto zahrnují do jednoho celku. Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin se dělí na **žíhání** a na **vytvrzování**. [12]

1.4.1 Žíhání

Rekrystalizační žíhání se provádí nejčastěji při teplotách 250 až 500 °C. Teplota závisí především na velikosti deformace za studena a na chemickém složení slitiny, popř. na čistotě hliníku. Rekrystalizační teplota se snižuje s rostoucí deformací a u technického hliníku také s růstem jeho čistoty. Tento způsob žíhání se používá u kovu tvářeného za studena. Původní struktura deformovaná tvářením rekrystalizuje za vzniku struktury nové. Pevnostní vlastnosti se sníží, plastické vlastnosti naopak vzrostou. Nevytvrditelné slitiny mohou být po ukončení rekrystalizace ochlazovány na vzduchu. Oproti tomu vytvrditelné slitiny musí být ochlazovány pomalu, tak aby nedošlo k částečnému přesycení tuhého roztoku a k následnému zvýšení pevnostních charakteristik. Někdy se také provádí **žíhání s částečnou rekrystalizací**, vzniká tak struktura, v níž jsou jak rekrystalizovaná zrna tak i tvářená struktura. [15]

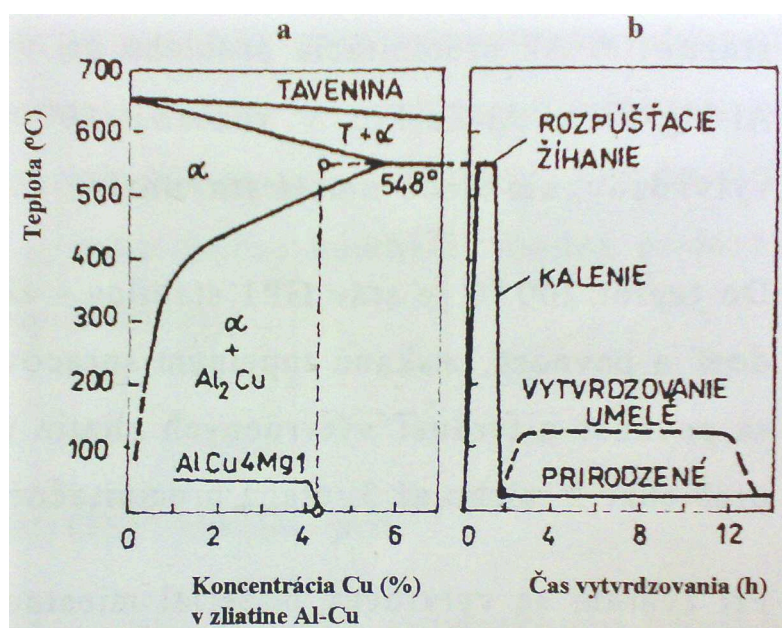
Stabilizační žíhání se provádí za účelem stabilizace struktury, mechanických, chemických a fyzikálních vlastností, případně rozměrů součástí. Tento způsob tepelného zpracování se užívá především v případě, má-li slitina v provozu pracovat za zvýšené teploty, nebo jestliže při tom dochází k jejímu zahřívání. Teplota žíhání leží většinou v rozmezí 240 až 350 °C a musí být vyšší než je maximální předpokládaná pracovní teplota. Stabilizační žíhání se nejčastěji aplikuje u odlitků. [15]

Žíhání ke snížení pnutí se obvykle provádí při teplotách v rozmezí 300 až 400 °C. Žíhá se pod rekrystalizační teplotu s předepsanou dobou výdrže na žíhací teplotě. Následuje řízené ochlazování výrobku minimálně do teploty 200 °C. [15]

Homogenizace se provádí při teplotě blízké teplotě solidu. Smyslem tohoto tepelného zpracování je odstranění nebo alespoň částečné snížení chemické heterogenity pomocí difúzních procesů. Poměrně často je možno se setkat i s homogenizací dvoustupňovou. Ta se od jednostupňové liší tím, že se aplikují dvě po sobě následující různě vysoké teploty. Účel je stejný. Doba žíhání je závislá v první řadě na chemickém složení slitiny a její struktuře, časově se jedná o nejdelší tepelné zpracování v průběhu výroby. [15]

1.4.2 Vytvrzování – precipitační zpevnění

Vytvrzováním je možno poměrně značně měnit mechanické, fyzikální a technologické vlastnosti hliníkových slitin. Nutnou podmínkou aplikace tepelného vytvrzování je, aby obsah legujícího prvku/prvků ve vytvrzované slitině byl na horní hranici její maximální rozpustnosti v hliníku a současně tato rozpustnost výrazně klesala s teplotou. Základním předpokladem precipitačního vytvrzování je tedy změna rozpustnosti v tuhém roztoku α a vznik přesyceného tuhého roztoku α . Vytvrzování se dělí na tři stádia. [15] [4]

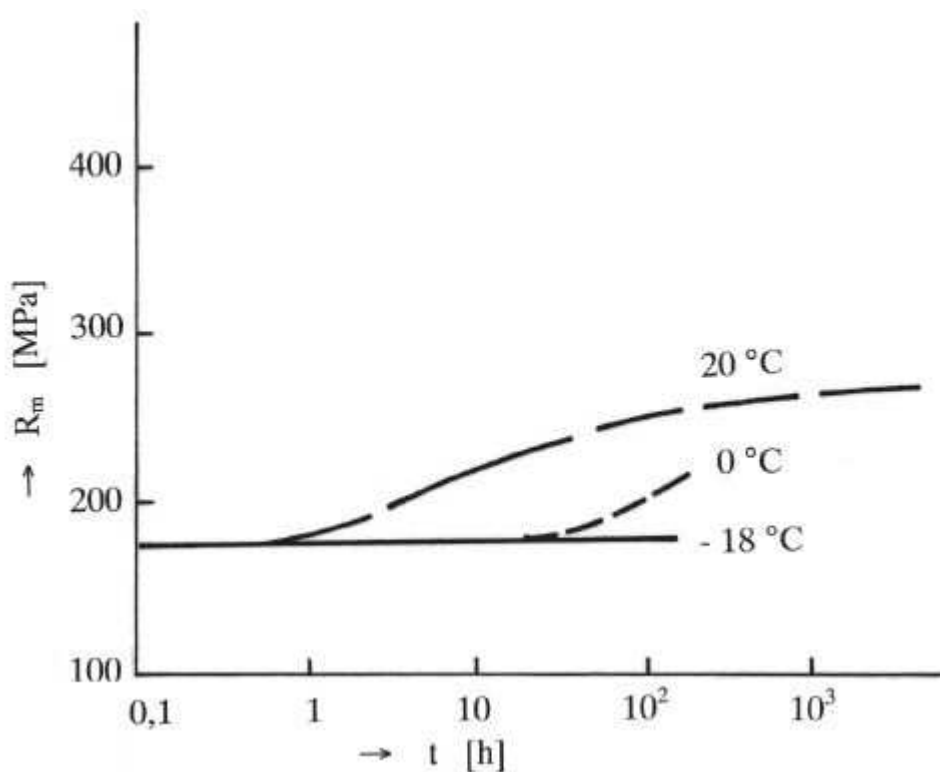


Obrázek 2: Princip a časový průběh tepelného zpracování vytvrzováním [4]

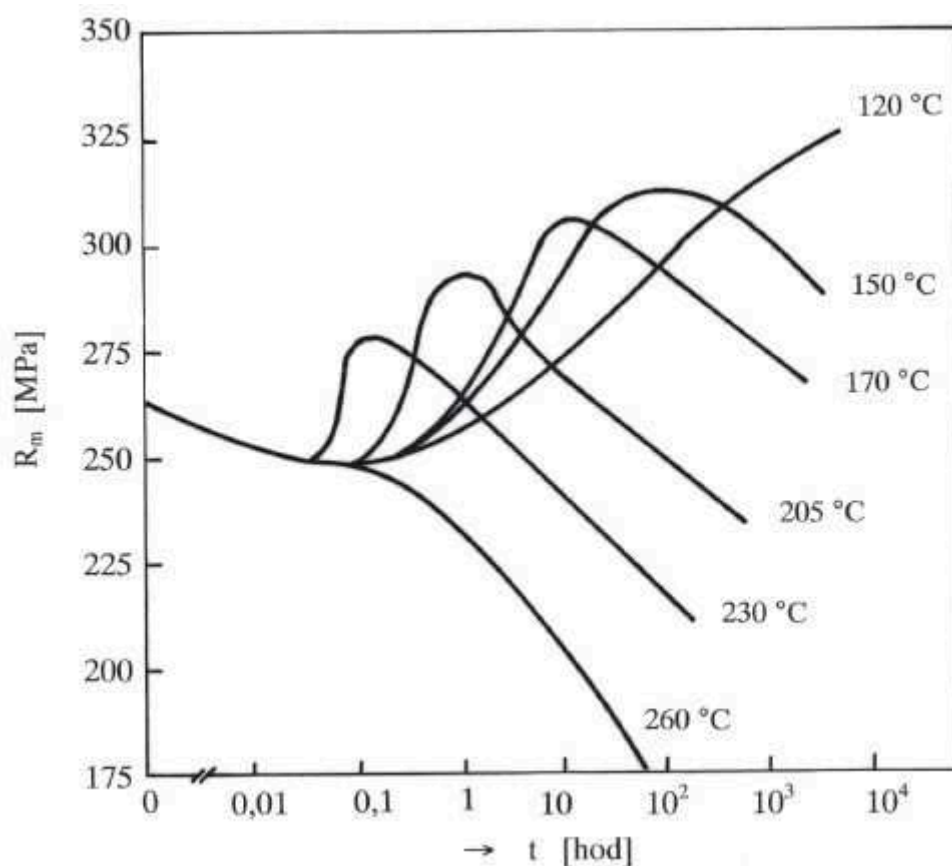
- Rozpouštěcí žíhání – je ohřev na potřebnou rozpouštěcí teplotu k rozpuštění intermetalických fází do tuhého roztoku (např. CuAl_2 , Mg_2Si). Je nutná určitá doba výdrže na rozpouštěcí teplotě tak, aby proces mohl proběhnout. [15]
- Kalení – následuje bezprostředně po rozpouštěcím žíhání. Prudkým ochlazením ze žíhací teploty vzniká přesycený tuhý roztok. Je nutno zajistit, aby rychlost ochlazení byla minimálně rovna kritické rychlosti ochlazení. „Jedná se o nejmenší rychlost ochlazení z rozpouštěcí teploty, při které nastává rozpad přesyceného tuhého roztoku.“ Nejpoužívanějším kalícím prostředkem je voda. [15]
- Stárnutí je precipitační proces, při němž dochází ke změně substruktury slitiny a tím i ke změně jejích fyzikálních, mechanických a technologických vlastností. Jestliže k němu dochází za pokojové teploty, tj. při 20 °C, pak se tento proces nazývá přirozené stárnutí. To je typické například pro slitiny na bázi Al-Cu-Mg.

U některých typů slitin však k rozpadu přesyceného tuhého roztoku dochází až při vyšších teplotách. Třeba slitiny typu Al-Zn-Mg nebo Al-Mg-Si je nutno zahřát na teplotu 100 – 180 °C. Tento proces nazýváme umělým stárnutím. Teplota stárnutí a čas potřebný k proběhnutí všech substrukturních změn se určuje z křivek kinetiky rozpadu. Na začátku procesu stárnutí vznikají difúzní zóny GP1. Jedná se o jednovrstvý koherentní precipitát. V etapě vzniku zón GP1 vykazují slitiny největší tvrdost a pevnost. V dalším průběhu procesu se z původních monoatomových vrstev začínají tvořit vícevrstvé destičkové útvary tzv. GP2. Při příliš dlouhé době umělého vytvrzování může dojít i k tzv. přestárnutí slitiny, dojde k poklesu pevnosti a tvrdosti. Někdy se provádí tzv. víceetapňové stárnutí, to bývá realizováno při dvou nebo více teplotách, které se zvyšují během žíhacího cyklu. [15] [4] [10]

Na následujících obrázcích je uvedena kinetika rozpadu přesyceného tuhého roztoku slitiny EN AW 6262.



Obrázek 3: Přírozené stárnutí - slitina EN AW 6262 [15]



Obrázek 4: Umělé stárnutí - slitina EN AW 6262 [15]

2 Svařitelnost hliníku a jeho slitin [14]

„Kovový materiál se považuje za svařitelný do určitého stupně při daném způsobu svařování a pro daný účel, lze-li odpovídajícím technologickým postupem svařování dosahovat kovové celistvosti svarových spojů tak, že tyto spoje vyhovují technickým požadavkům, jež se týkají jak vlastností samotných spojů, tak i vlivu těchto spojů na konstrukční celek, jehož součástí tyto spoje jsou.“ [1]

Technický hliník je dobře svařitelný, při použití metod, které zajistí rozrušení povrchové vrstvy oxidu hlinitého. Hliníkové slitiny jsou z důvodu omezené rozpustnosti legur v hliníku většinou nízkolegované. Legující prvky ovlivňují podstatnou měrou v závislosti na jejich procentuálním obsahu a vzájemné kombinaci svařitelnost. Za hlavní problémy při svařování hliníku a jeho slitin je možno považovat pórovitost svarů, sklon ke vzniku horkých trhlin ve svarech, přítomnost povrchové oxidické vrstvy Al_2O_3 a výrazný pokles pevnosti svaru u vytvrditelných slitin. Na základě srovnání jednotlivých

ukazatelů svažitelnosti (celistvost, R_m , chemické složení) je možno hliník a jeho slitiny rozdělit do dvou skupin: [2] [4]

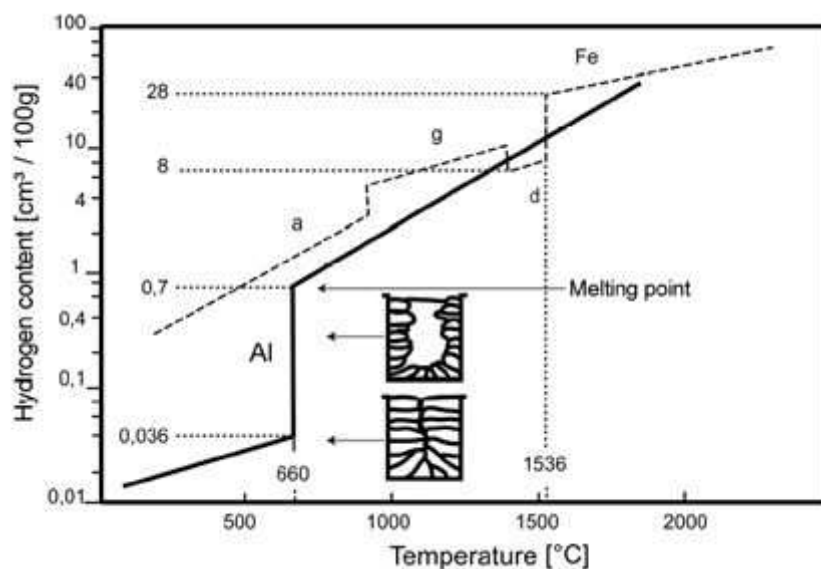
- materiály s dobrou svažitelností (Al, Al-Mg, Al-Mn, Al-Si)
- materiály se špatnou svažitelností (Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn)

Další vlastnosti hliníku, jež mají přímý vztah ke svažitelnosti: [4]

- Velká tepelná vodivost → vysoký odvod tepla a tím zvýšení požadavků na tepelný příkon. Dochází k velkému odvodu tepla, což komplikuje ohřev a místní natavení při svařování. Zejména u větších tloušťek nutno použít předehřev nebo směs Ar-He
- Modul pružnosti v tahu je u hliníku ve srovnání se železem třetinový, existuje zde velké riziko deformací svařence.
- Existují zde nepříznivé podmínky pro zapálení a hoření oblouku, např. oblouk TIG se stabilizuje až při dosažení teploty na povrchu materiálu cca 150 °C.
- Hliníkové materiály dodávané v polotvrdém nebo tvrdém stavu ztrácejí v celé oblasti TOO vyhrátém nad rekrytalizační teplotu (cca 150 °C) zpevnění získané deformací za studena. V TOO existuje rovněž riziko hrubnutí zrna.

2.1 Pórovitost svarů

Pórovitost svarů je jedním ze základních problémů při svařování hliníku. Je způsobena přítomností vodíku ve svaru. Jak je patrné z obrázku 5 roste rozpustnost vodíku v hliníku se stoupající teplotou. Kritickým místem je fázová přeměna z likvidu na solidus, kdy za teploty 660 °C se může v hliníku Al 99,5 rozpustit až 0,7 ml vodíku na 100 g svarového kovu, kdežto v solidu při teplotě 658 °C je to pouhých 0,036 ml/100g svarového kovu. Jelikož se jedná o velmi prudkou změnu rozpustnosti na malém intervalu teplot, nestačí všechen vodík absorbovaný v tavné lázni uniknout. Jeho část zůstane uzavřena v tuhém roztoku, kde vytváří vady typu dutin. Uvolňování vodíku dále pokračuje s klesající teplotou. Jelikož nadměrná přítomnost vodíku ve svaru způsobuje vnitřní pnutí, může dojít až ke vzniku studených trhlin.



Obrázek 5: Rozpustnost vodíku v hliníku [23]

Při svařování hliníkových materiálů je proto nutné snažit se o snížení přítomnosti vodíku ve svarovém kovu. Před zahájením svařování je třeba odstranit ze svarových ploch a jejich okolí všechny nečistoty (zejména organické), povrchové oxidy či případnou vlhkost. Dále je nutno použít kvalitní přídavné materiály s co nejnižším obsahem vodíku a řádně vysušené. Svařuje-li se s ochranným plynem, musí být tento vysoce čistý. Při samotném svařování může dojít k přehřátí svarové lázně a s tím související její navodíkování. Přehřátí lázně je možno zamezit snížením přívodu tepla do svaru, například zvýšením rychlosti svařování nebo použitím pulzního proudu. [4] [2]

2.2 Povrchové oxidy

Na povrchu hliníku a jeho slitin vzniká v důsledku reakce se vzdušným kyslíkem vrstvička Al_2O_3 . Teplota tavení oxidu hlinitého je 2050 °C, což je zhruba trojnásobek teploty tavení hliníku, navíc je tento oxid velmi tvrdý. Svými vlastnostmi zhoršuje svařitelnost, mohou vznikat neprůvary a rovněž se ztíží zapalování oblouku. Před svařováním je proto nutno vrstvu Al_2O_3 odstranit, to se provádí například broušením, kartáčováním nebo mořením vhodným chemickým činidlem. Očištěný materiál je nutno začít svařovat co nejdříve, protože nová oxidická vrstva se začíná tvořit prakticky okamžitě už při pokojové teplotě. Při zvýšených teplotách proces tvorby Al_2O_3 nabývá na intenzitě. Čas mezi čištěním a svařováním nemá být delší než tři hodiny. Další možností je využití čistícího účinku argonu. Při ručním obloukovém svařování metodou TIG se používá střídavý proud, k čistícímu účinku dochází v půlperiodě, kdy je elektroda kladným pólem.

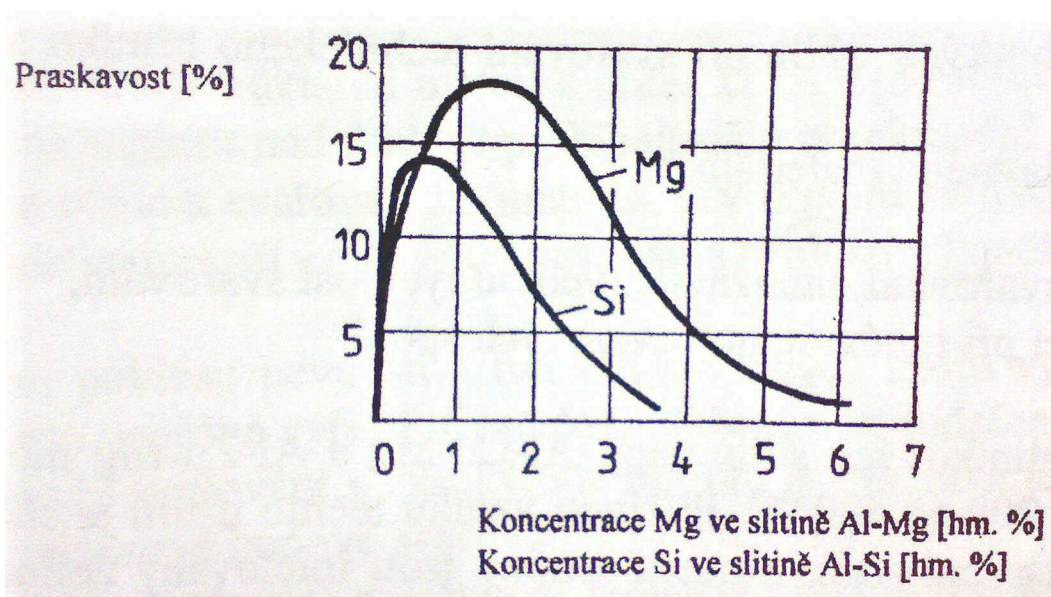
Vlivem dopadu kationtů na povrch materiálu dochází k rozrušování oxidické vrstvy. Další možné vysvětlení tohoto jevu se opírá o nižší ionizační energii Al_2O_3 oproti Al. [4] [2]

2.3 Trhliny

Při svařování hliníku a jeho slitin je velmi častým jevem vznik trhlín. Ty vznikají nejen v samotném svarovém kovu, ale i v TOO. Z hlediska teplot, při kterých vznikají, se dělí na trhliny horké a studené.

Horké trhliny vznikají v průběhu krystalizace svarové lázně. Různé druhy hliníkových slitin se vzájemně liší svou náchylností ke vzniku tohoto typu trhlín. Větší náchylnost vykazují svary se širokým intervalem tuhnutí. Šířku tohoto intervalu negativně ovlivňují nečistoty vytvářející nízkotavitelná eutektika. To vysvětluje, proč je technický hliník nižší čistoty náchylnější na praskavost než stejný materiál vyšší jakosti. Dodatečnou podmínkou je přítomnost tahových napětí, které jsou však při tavném způsobu svařování kovů přítomny ve svaru vždy. [2] [4]

Rovněž různé druhy legur a také jejich koncentrace mají vliv na praskavost. Na obrázku 6 je vynesena závislost praskavosti v procentech na koncentraci legujícího prvku. Pro každý typ slitiny hliníku existuje takzvaná kritická hodnota legujícího prvku, kdy je riziko vzniku horkých trhlín největší. [2] [4]

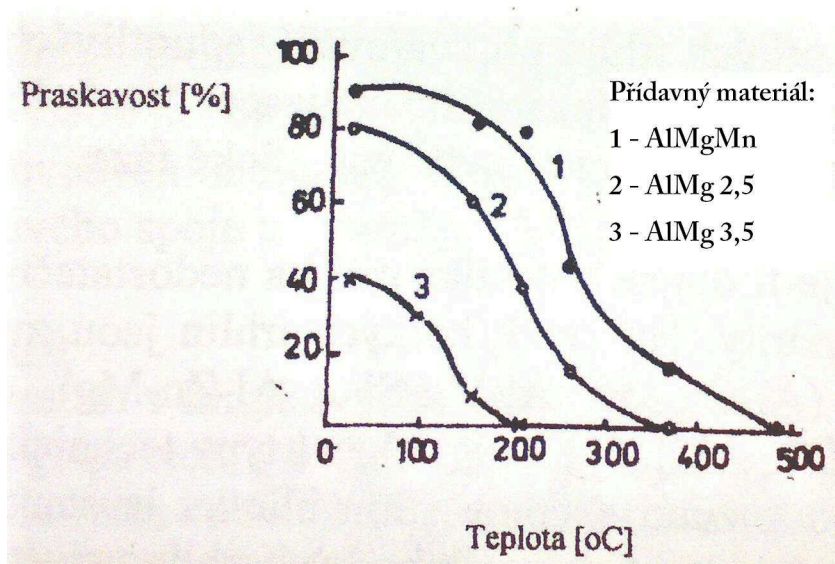


Obrázek 6: Závislost praskavosti na koncentraci legujícího prvku [2]

Zvyšuje-li se koncentrace legujícího prvku nad tuto kritickou hodnotu, praskavost klesá, až se při dosažení určitých hodnot blíží k nule. Vysvětluje se to tím, že s rostoucím procentem legury ve slitině roste množství eutektika vyplňujícího prostory mezi dendrity při krystalizaci. Trhliny tedy vznikají je-li objem eutektika malý a nedostatečně vyplňuje prostory mezi rostoucími dendrity. Toto zjištění se s výhodou používá v praxi při volbě vhodného přídatného materiálu. Vznik trhlin ovlivňuje také způsob krystalizace. Vliv na vznik horkých trhlin má rovněž zvolená svařovací technologie, svařovací parametry, tuhost svařence a teplota předehřevu. Na vznik horkých trhlin jsou zvláště náchylné některé slitiny hliníku, např. Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si nebo Al-Mg popřípadě technický hliník s vyšším obsahem nečistot ve formě Si a Fe. [2] [4]

Potlačit praskavost svarových spojů hliníkových materiálů lze využitím některé z následujících možností nebo jejich kombinací, jako jsou například: [2] [4]

- volba vhodného PM
- omezení tepelného příkonu do svaru
- volba vhodné technologie svařování, vysoká rychlost svařování
- použití předehřevu



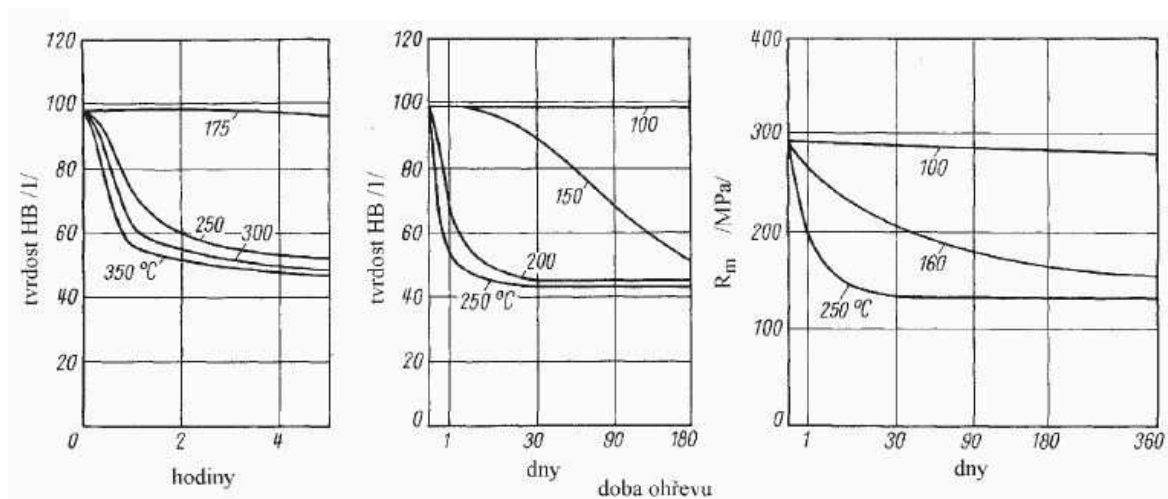
Obrázek 7: Vliv teploty předehřevu a PM na praskavost slitiny AlMg2 [2]

Studené trhliny vznikají oproti teplým trhlinám při nižších teplotách a jen u některých typů hliníkových slitin. Jedná se např. o Al-Cu-Mg nebo Al-Zn-Mg. Obvykle to bývá v rozmezí teplot od 200 do 400 °C při chladnutí svaru. Vlivem tahových zbytkových

napětí, přítomnosti vodíku ve svaru a rovněž struktury citlivé na jeho působení pak dojde ke vzniku trhliny. Povrch studených trhlín je na rozdíl od trhlín horkých lesklý, neoxidovaný. Studené trhliny mají transkrystalický charakter. Náchylnější k tomuto typu trhlín jsou vlivem nižších plastických vlastností a hrubozrnné struktury slévárenské slitiny. Aby se zamezilo vzniku tohoto typu trhlín, je vhodné dílec po svařování ochlazovat pozvolna. Dále je třeba minimalizovat přítomnost vodíku ve svarech. Tento typ trhlín vzniká především v TOO. [4] [2]

2.4 Pokles pevnosti a tvrdosti vytvrzených hliníkových slitin

Vytvrzované hliníkové slitiny (např. Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si) si zachovávají svou pevnost a tvrdost pouze do teploty kolem 200 °C. Každé překročení této teploty s sebou nese riziko poklesu pevnostních vlastností. To je tím větší, čím je vyšší teplota ohřevu, až při teplotě nad 400 °C poklesnou pevnostní charakteristiky na hodnoty ve vyžíhaném stavu. Při použití tavných metod svařování je tato hodnota překročena vždy, to znamená pokles pevnostních vlastností materiálu v závislosti na teplotě daného místa. Kromě samotné teploty hraje velkou roli i doba, po kterou vysoká teplota na materiál působila. K největšímu poklesu pevnosti a tvrdosti dochází v TOO v pásmu přehřátí. Při svařování začnou v celé oblasti TOO zahřáté nad teplotu 200 °C probíhat další děje. Např. pro slitinu Al-Cu je typický vznik nekoherentní stabilní intermetalické fáze Al_2Cu . Snížení či ztráta koherence se negativně projeví na pevnostních charakteristikách slitiny, tažnost a houževnatost se zvyšuje. Obdobné je to i u jiných precipitačně vytvrzených hliníkových slitin. [10] Z výše uvedeného tedy vyplývá, že na průběh odpevňovacích procesů má výrazný vliv nejen teplota, ale i čas, po který je materiál působení této teploty vystaven. Příklad těchto dějů je uveden na obrázku 8. [2] [15]



Obrázek 8: Vliv předchozího ohřevu na tvrdost a pevnost stanovenou při 20 °C u slévárenské slitiny G-AlSi10Mg, která byla před ohřevem ve stavu po umělém stárnutí [15]

Použitelné metody pro omezení poklesu pevnostních charakteristik vytvrzovaných hliníkových slitin: [2]

- svařovací metody s vysokým teplotním gradientem v místě svaru
- svařovací metody mající nižší pracovní teplotu, než je teplota, při které již dochází k poklesu pevnostních vlastností
- svar a jeho okolí po svařování opět tepelně zpracovat vytvrzováním

3 Metody svařování hliníku a jeho slitin [14]

Hliník a jeho slitiny je možno svařovat celou řadou různých svařovacích metod. Nejvíce využívanými metodami v průmyslové praxi jsou metody TIG 141 a MIG 131. Dalšími vhodnými možnostmi jsou např. obloukové svařování obalenou elektrodou, svařování elektronovým nebo laserovým paprskem, plazmou, odporové svařování, difúzní, ultrazvukové a tlakem za studena V poslední době nabývá na významu poměrně nová technologie friction stir welding, které je věnována podstatná část této práce. [2]

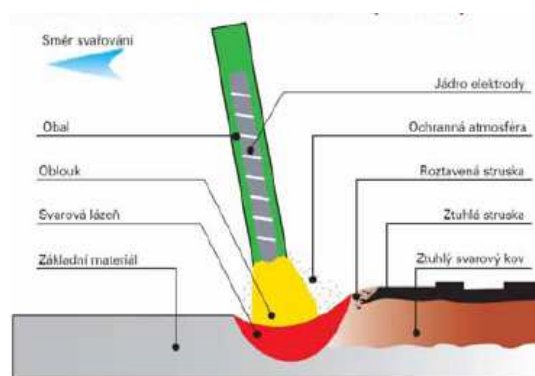
3.1 Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou

V posledních letech tato metoda svařování poněkud ustupuje do pozadí a je nahrazována progresivnějšími metodami, jako jsou např. metody MIG a TIG.

Významnou úlohu si však ponechává zejména v údržbě, v opravárenství a rovněž při svařování ve venkovním prostředí. Tato technologie je nevhodná pro svařování mechanicky namáhaných součástí.

3.1.1 Princip metody

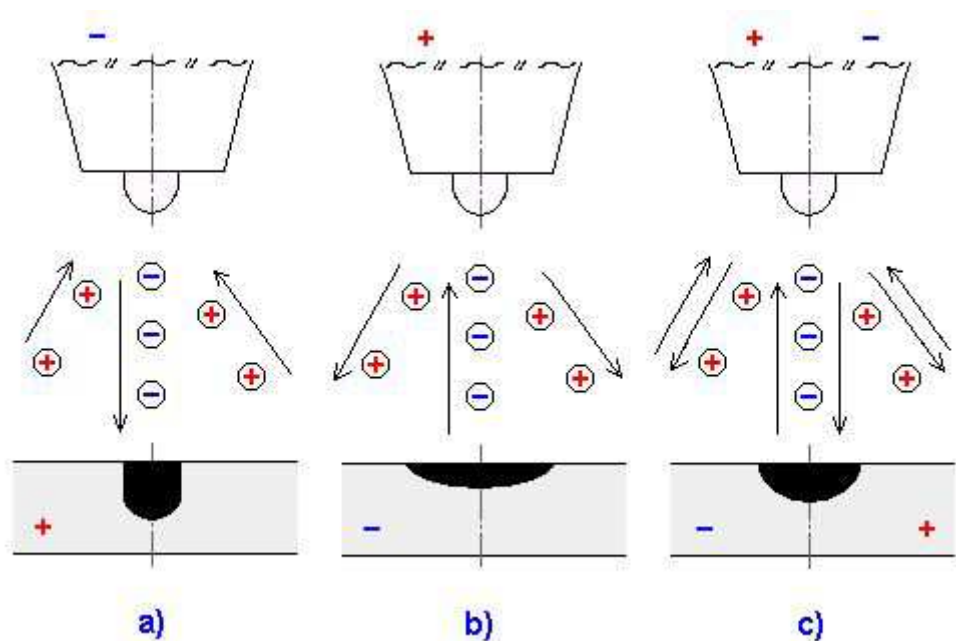
Zdrojem tepla je zde elektrický oblouk, který hoří mezi elektrodou a základním materiálem. Oblouk využívaný ve svařování je nízkonapěťový vysokotlaký elektrický výboj. Pro stabilní hoření oblouku je potřeba dostatečně vysoké napětí a proud, aby bylo dosaženo ionizace prostředí a jeho udržení v tomto stavu. [27] [3]



Obrázek 9: Svařování obalenou elektrodou [28]

3.1.2 Použití při svařování hliníku a jeho slitin

Při svařování hliníku a jeho slitin obalenou elektrodou je třeba dbát na její správné zapojení. Používá se výhradně zapojení s nepřímou polaritou. Při tomto zapojení se plně projeví tzv. čistící účinek elektrického oblouku. Ten se vysvětluje tím, že katodová skvrna jakožto místo s nejvyšší emisí elektronů se přesouvá do oblasti s nejvyšším elektrickým potenciálem. To v případě hliníku odpovídá oblasti zvýšeného výskytu Al_2O_3 . Dochází pak k odpařování oxidu způsobeným katodovou skvrnou. [24]



Obrázek 10: Možnosti zapojení elektrody a vliv na průvar. a) DC – přímá polarita, b) DC – nepřímá polarita, c) AC [24]

Technologie svařování hliníku metodou 111 není příliš odlišná od svařování ocelí. V průmyslové výrobě se nepoužívá, uplatnění nachází při opravách a údržbě. Nedoporučuje se používat tuto metodu pro svary mechanicky namáhané nebo vystavené agresivnímu koroznímu prostředí. [2]

Zvýšenou pozornost je třeba věnovat skladování a sušení elektrod z důvodu náchylnosti hliníkových materiálů na navodíkování. Hlavní funkce obalu elektrod jsou: [24] [2]

- hořením vzniká plyn chránící tavnou lázeň před přístupem vzduchu
- jsou v něm obsaženy prvky pomáhající rozpouštění Al_2O_3 , obaly obsahují chloridy, fluoridy a kryolit
- stabilizace elektrického oblouku
- formování svarové housenky
- legující funkce
- dobře odstranitelná struska

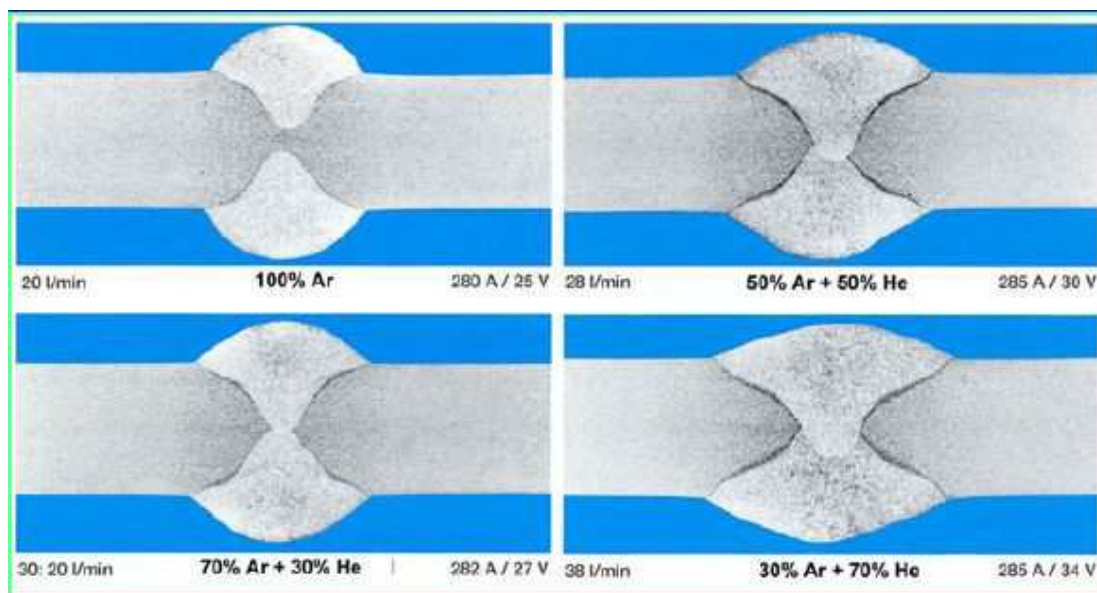
3.2 Obloukové svařování v ochranných atmosférách

Svařování v ochranných plynech je v současnosti nejvíce používaný způsob svařování hliníkových materiálů, zejména pak v průmyslové výrobě. Podstatou těchto metod je hoření elektrického oblouku v ochranné atmosféře chránící tavnou lázeň a elektrodu před přístupem vzduchu. Ochranný plyn musí rovněž pozitivně působit při zapalování oblouku a umožnit jeho stabilní hoření. Ochranná atmosféra může být aktivní nebo inertní. Pro svařování hliníku a jeho slitin je nutno k ochraně svarové lázně používat výhradně inertní plyny, popř. jejich směsi. Technologie je možno dále rozlišit podle toho, zda je použita tavící se (MIG 131) nebo netavící se (TIG 141) elektroda. Obě výše uvedené metody našly široké uplatnění při svařování hliníkových materiálů.

3.2.1 Inertní plyny

Jak inertní, tak i aktivní plyny mají za úkol chránit tavnou lázeň před přístupem okolní atmosféry. Inertní plyny a jejich směsi, na rozdíl od plynů aktivních, s tavnou lázní nereagují. Nezpůsobují tedy propal prvků. Při svařování hliníku a jeho slitin je důležitá zejména jejich netečnost ve smyslu oxidace a tím tvorby nežádoucího Al_2O_3 . Pro svařování se používá hélium, argon nebo jejich směsi. Oba tyto plyny jsou bezbarvé, bez chuti a zápachu, nejedovaté a nehořlavé. Hélium je asi 7× lehčí než vzduch, argon je pak 1,3× těžší než vzduch. Tepelná vodivost argonu je v porovnání s héliem malá. Ionizační potenciál argonu rovněž není příliš vysoký, je to 15,8 eV, což umožňuje dobré zapálení oblouku a jeho stabilitu. Naproti tomu je ionizační potenciál helia se svými 24,6 eV vysoký. Oblouk se špatně zapaluje a jeho stabilita je horší. V praxi se často využívají směsi těchto plynů, které v sobě vhodně kombinují vlastnosti jednotlivých složek. [3]

Vliv složení směsi Ar-He na průvar je znázorněn na obrázku 11. Je třeba dále upozornit na nutnost zvýšení průtoku ochranného plynu a také velikosti napětí při zvyšujícím se podílu hélia.



Obrázek 11: Složení plynu a jeho vliv na průvar [28]

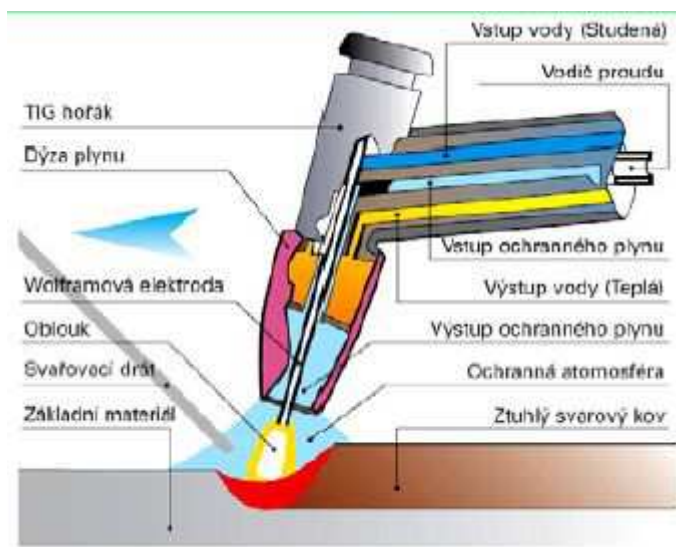
3.2.2 Metoda TIG 141

Metoda TIG (tungsten inert gas) bývá často označována i jako WIG (wolfram inert gas) nebo je také možno setkat se s americkým označením GTAW (gas tungsten arc welding).

3.2.2.1 Princip metody

Stejně jako u metody 111 je zde zdrojem tepla elektrický oblouk a platí pro něj vše, co je uvedeno v kapitole 3.1.1. Oblouk hoří mezi netavicí se wolframovou elektrodou a základním materiálem. K ochraně svarové lázně a elektrody se používá výhradně inertní plyn vysoké čistoty přesahující 99,99 %. Ke svařování touto metodou je možno použít jak zdroje střídavého, tak i stejnosměrného napětí. U stejnosměrných zdrojů se využívá zapojení s přímou i nepřímou polaritou. Druh použitého proudu a způsob zapojení elektrody se řídí typem svařovaného materiálu a dalšími technologickými požadavky, jako je např. tepelné zatížení elektrody. Zapalovat oblouk lze dotykově zkratem nebo bezdotykově za využití vysokofrekvenčního vysokonapěťového ionizátoru. Z těchto dvou metod zapalování oblouku lze jednoznačně doporučit bezdotykové zapálení. Dotykem wolframové elektrody totiž s velkou pravděpodobností dojde k jejímu znehodnocení základním materiálem a v něm naopak ke vzniku wolframových vměstků.

Metoda 141 je vhodná jak pro ruční, tak i pro strojní svařování, kde se přidávání drátu musí řešit automatickým integrovaným zařízením. Svařovat lze buď s přidáváním PM ve formě drátu nebo bez PM.



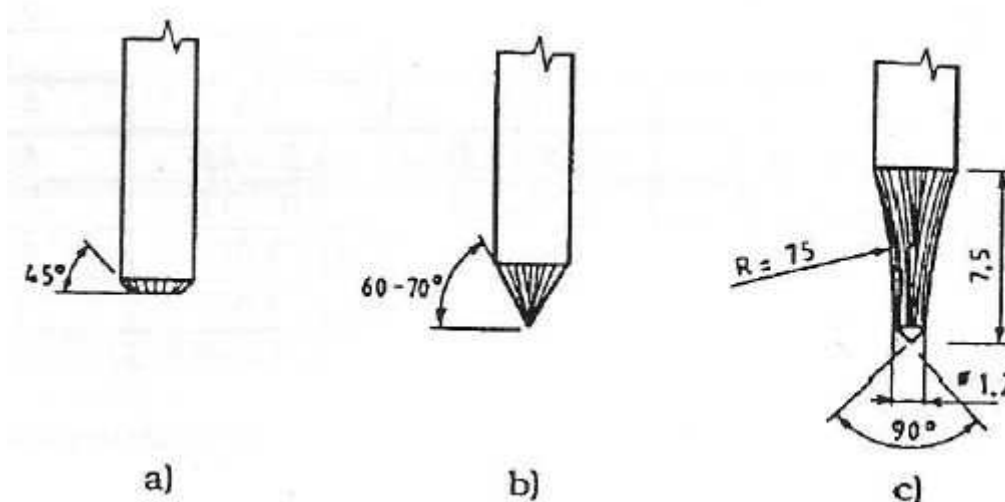
Obrázek 12: Schéma svařování metodou 141 s přidáváním drátu [28]

Přídavný materiál může být buď ve formě tyček, jedná se o drát kruhového průřezu standardní délky 600-1000 mm, pro ruční svařování nebo ve formě drátu navinutého na cívce pro svařování strojní. PM obecně má plnit několik základních funkcí: [3]

- doplnění objemu svarového kovu ve svaru
- dolegování svarového kovu
- desoxidační
- odplyňovací
- metalurgická
- pomáhá formovat svar
- vhodnost pro svařování v polohách

Netavící se elektrody jsou vyráběny ze spékaného wolframu. Teplota tavení wolframu je 3380 °C. Elektrody mohou být buď jen z wolframu o čistotě 99,9 %, nebo jsou legovány oxidy některých kovů. Pro legování elektrod se nejčastěji se používají: lanthan, thorium, cer, yttrium a zirkon. Legováním elektrod těmito oxidy se dosáhne podstatného snížení teploty ohřevu elektrody až o 1000 °C, čímž se zvýší její životnost. Žhavicí teplota legovaných elektrod naopak stoupne až na 4200 °C, pokud se leguje oxidem lanthaničitým. Díky zvýšené emisi elektronů se zlepší rovněž stabilita oblouku a usnadní se jeho

zapalování. Obsah oxidů používaných pro legování elektrod se pohybuje v řádu od desetin procenta až po cca 4 procenta. Elektrody jsou na jednom z konců barevně označeny. Elektrody se před svařováním brousí do potřebného tvaru. Příklad je uveden na obrázku 13. [3] [4]



Obrázek 13: Tvary konců elektrod po broušení. a) ruční svařování - AC, b) ruční svařování - DC, c) strojní svařování – DC [3]

Základní parametry svařování metodou 141 jsou elektrický proud, napětí a rychlost svařování.

3.2.2.2 Použití při svařování hliníku a jeho slitin

Pro svařování technického hliníku se používá střídavý proud. Metoda 141 je vhodná pro použití v rozsahu tlouštěk ZM od cca 1 až 10 mm. Větší tloušťky materiálu už není tak výhodné svařovat z důvodu omezené produktivity metody. Jako ochranný plyn se nejčastěji používá argon nebo jeho směs s héliem pro svařování větších tlouštěk. Chemické složení PM má být stejné nebo velmi podobné, jako má ZM. Materiál větších tlouštěk (od cca 8 mm) je třeba svařovat s přehřevem.

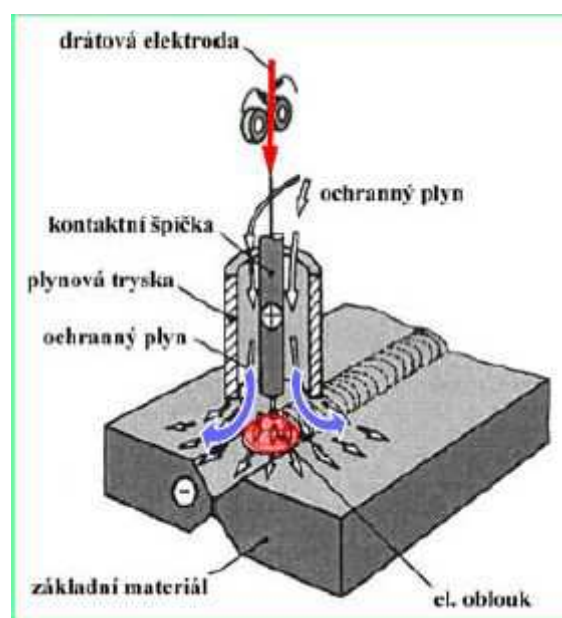
Pro svařování slitin hliníku platí obdobná doporučení. Přídavný materiál je však třeba volit podle konkrétních typů slitin. Pro plechy velmi malých tlouštěk lze použít stejnosměrný proud s nepřímou polaritou. Vhodné je i použití impulsního proudu.

Hliník je možno svařovat i stejnosměrným proudem s přímou polaritou, za předpokladu použití směsi hélia a argonu v poměru minimálně 75:25. Vysoký obsah hélia předá do svarové lázně dostatečné množství tepla postačující k roztavení povrchové vrstvy Al_2O_3 . Roztavené oxidy se působením povrchových sil stahují na okraj taveniny. Toto zapojení je vhodné pro svařování rozměrných dílců. [3]

3.2.3 Metoda MIG 131

3.2.3.1 Princip metody

Jedná se o obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně inertního plynu. Oblouk hoří mezi tavící se elektrodou a základním materiálem. Funkci elektrody u této metody plní v podstatě přídavný materiál. Tento může být buď ve formě plného nebo plněného (trubičkového) drátu. Je navinut na cívce a do hořáku je nepřetržitě zajištěn jeho přísun pomocí podávacích kladek. Funkce PM jsou stejné jako u metody 141. Přívod proudu na elektrodu je zajištěn v hořáku kontaktním průvlekem. K ochraně svarové lázně a elektrody se používá inertní plyn.



Obrázek 14: Princip svařování metodou MIG [28]

Jako zdroje proudu se dnes převážně používají svařovací invertory s plochou statickou charakteristikou. Svařuje se stejnosměrným proudem. Způsob zapojení elektrody se opět

řídí typem svařovaného materiálu, požadavky na průvar, šířku housenky atd. Oblouk se zapaluje dotykově. [3]

Metoda 131 je vhodná jak pro ruční, tak i pro strojní svařování. Svařování touto metodou má vysokou produktivitu.

Základní parametry svařování metodou 131 jsou stejně jako u jiných metod obloukového svařování elektrický proud, napětí a rychlost svařování.

3.2.3.2 Použití při svařování hliníku a jeho slitin

Metoda 131 je pro své dobré vlastnosti a vysokou produktivitu nejpoužívanější technologií při svařování rozměrných hliníkových dílů. Při svařování středních a velkých tloušťek je třeba použít přehřev. Doporučuje se přehřívat na 150 až 200 °C s ohledem na druh materiálu. Pro svařování tenkých dílců nebo materiálů vytvrzovaných se využívá pulzní proud. Zdroje svařovacího proudu, určené pro svařování hliníku, bývají vybaveny funkcí horkého startu. Tím se usnadní natavení materiálu při zahájení svařování. Při ukončení svaru se proud naopak postupně snižuje, aby bylo možno vyplnit koncový kráter. [3] [16]

Pro ochranu tavné lázně se při svařování hliníkových slitin metodou 131 používají inertní plyny. Výjimečně i směsi s lehce oxidačním účinkem, v tomto případě se už však bude jednat o metodu MAG 135. Argon je vhodný pro svařování materiálů o menší tloušťce, nehodí se naopak pro tupé vícevrstvé spoje. Pro tyto tlustší materiály je výhodné použít směs s héliem pro jeho výrazně vyšší tepelný výkon a výhodnější průřez svaru. Jako náhrada za drahý směsný plyn Ar-He se někdy používají směsi Ar-O₂. Oblouk hoří, v porovnání s čistým argonem, stabilněji. Je však nutno omezit obsah kyslíku ve směsi pro jeho výrazné oxidační vlastnosti. Ten je ve většině případů 1 %, ojediněle lze použít směsi s obsahem kyslíku až 3 %. [16]

Chemické složení přídavného materiálu má být stejné jako je složení ZM z důvodu zachování jeho vlastností např. odolnosti proti korozi. U slitin náchylných na vznik horkých trhlin se může použít PM z téže materiálové skupiny s vyšším obsahem legur omezujících praskavost. Např. při svařování slitiny AlMg3 se použije drát AlMg5. [16]

Při svařování vytvrzených hliníkových slitin je třeba vzít do úvahy pokles pevnosti způsobený teplotním cyklem svařování. Je proto nutno volit takový postup a režim svařování, kterým bude materiál co nejméně tepelně ovlivněn. Vhodné je např. svařování pulzní a také strojní. To je zde výhodné zejména proto, že je při něm možno využít vyšší svařovací rychlosti a tím omezit tepelný příkon. Materiál se po svařování dále tepelně nepracovává. Je to dáno nevhodností používaných PM (AlSi5, AlMg5) pro kalení a další vytvrzování. Toto se tak docela netýká samovytvrditelných slitin po svařování, jako jsou např. AlZn4Mg1 nebo AlZn3Mg2. Svarový spoj se po svařování na vzduchu zakalí a poté dojde k jeho přirozenému vytvrzení. Pevnost pak dosahuje po dvaceti dnech hodnot 250 až 280 MPa. [16]

3.3 Vysokoenergetické metody tavného svařování

Pojem vysokoenergetický je zde chápán ve smyslu působení energie o vysoké koncentraci na malý průřez. Tím se docílí podstatného snížení spotřeby tepelné energie na jednotku délky svaru a současně se dosahuje vysoké hustoty energie v dopadové ploše. Mezi tyto metody tavného svařování se řadí svařování laserem, elektronovým paprskem a plazmou. Podle normy ČSN EN ISO 4063 patří svařování plazmou mezi obloukové metody. U svařování elektronovým paprskem a laserem se pak jedná o svařování svazkem paprsků. Jsou vhodné pro automatizaci a robotizaci. Při použití těchto metod je svařovaný materiál vystaven krátkodobému účinku vysoké energie. Tím se dosáhne omezení difúzních pochodů, propalu prvků a také deformací. Snížením vneseného tepla do svaru dojde ke zúžení TOO, což příznivě ovlivní kvalitu svaru. Právě pro tyto vlastnosti jsou uvedené metody vhodné pro svařování vytvrditelných hliníkových slitin. [29] [3]

3.3.1 Plazmové svařování

Princip plazmového svařování je založen na ionizaci plynu při průchodu elektrickým obloukem. Tato metoda se v mnohém podobá metodě TIG s tím, že do oblouku se vhání plazmový plyn. Díky zúžené výstupní plazmové trysce a fokusačnímu plynu vzniká na výstupu velmi úzký proud plazmy. Jako fokusační plyn je nutno u svařování hliníkových materiálů použít plyn inertní. Pro ochranu svarové lázně se použije rovněž inertní plyn. Svařovat je možno jak velmi tenké plechy, tak i tlustší materiál. Výhodou je

vysoká rychlost svařování, a v porovnání s elektronovým nebo laserovým svařováním také podstatně nižší cena zařízení. [29] [3]

Svařovat plazmou je možné všechny druhy hliníkových materiálů. Svařuje se střídavým proudem, u materiálů s rizikem přehřátí se používá pulzní proud. [3]

3.3.2 Elektronové svařování

Tato metoda je založena na přeměně kinetické energie letících elektronů na energii tepelnou, k níž dochází po dopadu elektronů na povrch svařovaného tělesa. Teplota v místě dopadu dosahuje až 25 000 °C. Elektrony jsou emitovány katodou a pomocí magnetického pole fokusovány a směřovány do místa svařování. Celý proces musí probíhat ve vakuu. TOO svaru je velmi úzká, vnesené teplo minimální. Metoda je náročná na přesné opracování a čistotu svařovaných dílů, PM se používá výjimečně. Nutnost dosáhnout vakua využitelnost metody podstatně snižuje, má to však i své výhody. Vakuum chemicky a tepelně izoluje katodu a současně také chrání samotný svarový spoj. [29] [3]

Tuto metodu lze použít pro svařování všech hliníkových materiálů. Dokonce je možno svařovat kombinace jako jsou např. Ti – Al, Cu – Al, Al – Ni. [3]

3.3.3 Laserové svařování [29] [3]

Princip této metody spočívá v zesílení světla stimulovanou emisí záření. Excitované elektrony se vlivem vnějšího podnětu vrátí na základní energetickou hladinu a dojde k vyzaření kvanta energie podle rovnice 1. Foton jako kvantum energie přímo zvyšuje teplotu materiálu tím, že po jeho absorpci dojde k většímu rozkmitu mřížky. Absorpce výrazně závisí na teplotě, vlnové délce záření a druhu materiálu.

$$E = h \cdot f \quad (3.1)$$

kde h [J·s] je Planckova konstanta
 f [s⁻¹] frekvence elektromagnetického záření

Vlastnosti laserového paprsku jsou:

- koherence (fotony mají stejný směr, frekvenci a fázový posun)
- je konvergentní (sbíhavý)
- je monochromatický (jednobarevný, vyplývá to ze stejné frekvence)

Používané lasery mohou být podle typu aktivního prostředí buď pevnolátkové nebo plynové. Plynové lasery pracují v kontinuálním nebo pulzním režimu. Emitované záření je vedeno soustavou zrcadel do technologické hlavy, v níž je paprsek fokusován na povrch svařovaného dílu. Při laserovém svařování není třeba používat PM. Svar je úzký, TOO minimální se všemi z toho plynoucími důsledky. Nároky na přesné opracování ZM jsou stejně jako u elektronového svařování vysoké.

Hliníkové materiály jsou laserem poměrně dobře svařitelné. Je však nutno počítat s vysokým stupněm odrazivosti. Ta je závislá nejen na lesku povrchu materiálu, ale i na vlnové délce dopadajícího záření (viz. tabulka 3). Pro svařování hliníku se používají lasery s vysokou energií, provádí se zdrsňování povrchu, popř. se materiál zmatní.

Tabulka 3: Součinitel odrazivosti hliníku [3]

Materiál	Vlnová délka λ (μm)		
	0,7	1,06	10,6
Al	0,87	0,93	0,97

3.4 Odporové svařování [3]

Významným zástupcem tlakového svařování je svařování odporové. Vlivem průtoku elektrického proudu se materiál zahřeje a stane se plastickým. Poté dojde ke stlačení materiálu k sobě a jeho svaření. V místě styku svařovaných materiálů vniká při průchodu proudu tzv. přechodový odpor, který je zdrojem tepla. Vnesené teplo do svaru je možno stanovit na základě Joule-Lenzova vztahu.

$$Q = k \cdot R \cdot I^2 \cdot t \quad (3.2)$$

kde Q [J] je celkové množství tepla
 R [Ω] je suma všech přechodových odporů
 I [A] je elektrický proud

t [s] je doba průchodu proudu

k [-] koeficient vyjadřující ztráty

Při odporovém svařování se nepoužívá PM. Hlavními parametry jsou:

- svařovací proud I
- přítláčná síla P
- svařovací čas t

Hliník má některé vlastností, které podstatně ovlivňují průběh a výsledek svařování touto metodou. Jako první je třeba zmínit vysokou elektrickou vodivost, z čehož naopak vyplývá jeho malý elektrický odpor. Rovněž tepelná vodivost hliníku je ve srovnání s ocelí vysoká. Vlastností, která naopak svařování napomáhá je nízká teplota tavení hliníkových materiálů. Ke svařování hliníku je nejvhodnější tzv. tvrdý režim. Jedná se o svařování vysokým proudem s krátkým strojním časem. U bodového odporového svařování se v tomto režimu používá tlak vyšší než 5 MPa a proudové zatížení přesahující 200 A/mm². Svařovací čas je kratší než 20 period, používá se v rozsahu 0,04 – 0,4 s. Technologie vyžaduje dokonalé očištění stykových ploch. Při bodovém svařování dochází k malému tepelnému ovlivnění ZM, z tohoto důvodu je tato metoda vhodná pro svařování vytvrzených hliníkových slitin.

3.5 Speciální metody tlakového svařování

Svarový spoj vzniká silovým působením na svařované části a jejich současným přiblížením na vzdálenost působení meziatomových sil. To znamená téměř až na vzdálenost rovnající se velikosti mřížkové konstanty. K vytvoření svarového spoje tlakovými metodami je zapotřebí určité míry plasticity spojovaných materiálů. Materiály s kubickou plošně centrovanou mřížkou, například hliník, tomuto kritériu vyhovují. [3]

3.5.1 Difúzní svařování

Hlavními parametry této metody jsou tlak, teplota a čas. Teplota má vliv na rychlost difúze, navíc zvyšuje plasticitu kovů. Výše svařovacího tlaku musí být dostatečně vysoká tak, aby došlo k potřebnému přiblížení svarových ploch v celém průřezu. Čas musí být

dostatečně dlouhý pro zajištění difúzních pochodů. Volí se na základě hodnot teploty a tlaku. Difúzní svařování se většinou provádí v prostředí vakua. [3]

Tato metoda je vhodná pro svařování hliníkových materiálů. U vytvrditelných slitin hliníku však dochází vlivem působení zvýšené teploty a delšího svařovacího času k poklesu pevnostních vlastností. [3]

3.5.2 Tlakem za studena

Podstatou této metody je přiblížení povrchů svařovaných dílů téměř až na vzdálenost mřížkové konstanty. Další podmínkou je výrazná plastická deformace materiálu, pro hliník to je minimálně 60 %. Významný je rovněž poměr tvrdosti oxidů k tvrdosti kovu. Čím je tento poměr vyšší, tím se oxidy snadněji rozruší a dojde k jejich vytlačení do výronku. Pro Al_2O_3 a hliník je tento poměr 4,5, což je velmi dobré. [3]

Potřebný svařovací tlak pro Al je zhruba do 1 GPa. Ke svařování se používají hydraulické lisы, dílce jsou upnuty v přípravcích. Nedochází ke vzniku taveniny ani tepelnému ovlivnění materiálu. Spoj má jemnozrnnou strukturu. Tato metoda je proto velmi vhodná pro svařování vytvrditelných hliníkových slitin. [3]

3.5.3 Ultrazvuk

Ke svařování se zde využívá mechanické kmitání o vysoké frekvenci. Hlavními parametry jsou: [3]

- amplituda výchylky sonotrody (optimum je 5–35 μm)
- přítláčná síla (0,4–1,2 MPa)
- frekvence ultrazvuku (10–100 Hz)
- svařovací čas (3–6 s)

Hliník a jeho slitiny (včetně vytvrditelných) jsou touto metodou dobře svařitelné nejen mezi sebou, ale i s mnoha jinými kovy. Problém nastává pouze v případě, že je rozdíl poloměrů atomů ve slitině větší než cca 18 %. Pak se ultrazvukový spoj nevytvoří. [3]

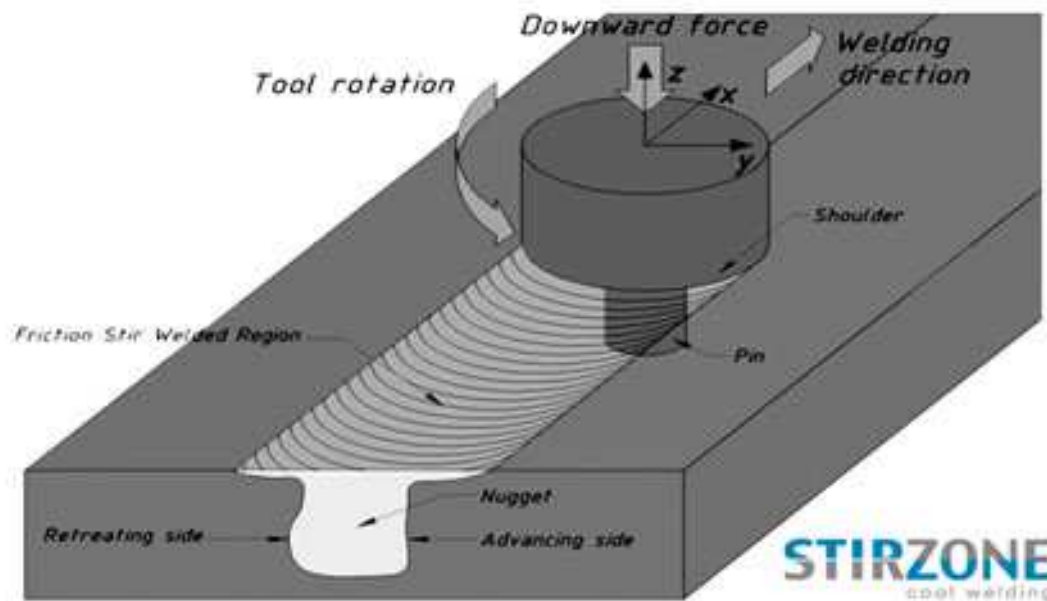
3.6 Friction stir welding

Friction stir welding je poměrně nová svařovací metoda. Byla vyvinuta a patentována v roce 1991 v Cambridge anglickou firmou TWI. Ve výrobě je využívána od roku 1998. V českém názvosloví se tato metoda nazývá „Třecí svařování promísením“.

Aktivační energie potřebná ke vzniku svarového spoje se zde dodává jak mechanickou aktivací tak i aktivací termickou. Vzhledem k výše uvedenému je možno metodu FSW charakterizovat jako tlakové svařování za zvýšené teploty. K zahřátí svařovaného materiálu dochází vlivem tření. Dle normy ČSN EN ISO 4063 má tato metoda číselné označení 43 a řadí se do skupiny metod svařování třením. Energie tření se z 95 až 98 % mění na energii tepelnou.

3.6.1 Princip metody

Rotující nástroj se v počáteční fázi svařování natlačí do svařovaného materiálu. Nástroj vykonává jednak rotační pohyb a dále (po natlačení se do materiálu) pohyb translační ve směru svařování. Působením nástroje, v místě kontaktu trnu se svařovaným materiálem, vzniká třecí teplo, čímž dojde ke vzniku vysoce plastické zóny v základním materiálu. Nedochozí tedy k roztavení svařovaného materiálu, ale pouze k jeho změknutí následkem teploty, která dosahuje cca 80 až 85 % teploty tavení. Tlak, kterým působí nástroj na zplastizovaný materiál, ho přesouvá dozadu za nástroj, kde materiál chladne a tuhne. Vlivem rotačního pohybu navíc dochází ke vzájemnému promísení kovu. Zároveň dojde ke spojení a k vytvoření pevného spoje bez pórů nebo vměstků. Svařované díly musí být pevně a přesně upnuty k základní desce zařízení. [44] [43]



Principle of FSW

Obrázek 15: Princip svařování metodou FSW [46]

Svařuje se bez PM a bez ochrany plynu Materiály citlivé na kyslík se svařují v ochranných plynech inertních.

Metoda FSW není vhodná pro každý typ svarového spoje. Nejvýhodnější je svařování tupých svarů a spojů s přesahem. Naopak provedení koutových svarů bývá problematické. Pokud to dovolí tvar konstrukce je možno zaměnit koutový svar za T-svar s přesahem.

Parametry svařování metodou FSW jsou uvedeny níže. Klíčovými jsou rychlost rotace nástroje a posuv.

- otáčky za minutu ω [ot. / min]
- rychlost posuvu v [mm / min]
- sklon nástroje α [°]
- přítlak P [MPa]
- hloubka zanoření z [mm]

Na volbě těchto parametrů závisí mechanické vlastnosti svaru. Rotace ovlivňuje pohyb zplastizovaného materiálu okolo hrotu a přispívá ke tření. S vyšší rychlostí rotace se materiál více zahřívá, nárůst však není lineární. Posuv nástroje završuje přesun

materiálu z přední strany hrotu dozadu. Jeho náklon zajišťuje správný tok materiálu okolo hrotu a ramena nástroje. Bývá v jednotkách procent nebo nulový, to závisí také na reliéfu ramene. Čím je náklon větší, tím je nutno aplikovat větší přítláčnou sílu. Z hlediska hloubky zanoření ramene platí, že pokud je zanoření příliš malé, odvod materiálu za nástroj není ideální. Při příliš hlubokém zanoření dojde k zeslabení tloušťky svaru. [32]

Jelikož je princip metody FSW značně odlišný od klasických tavných způsobů svařování, odlišnou strukturu má i průřez svaru touto metodou.

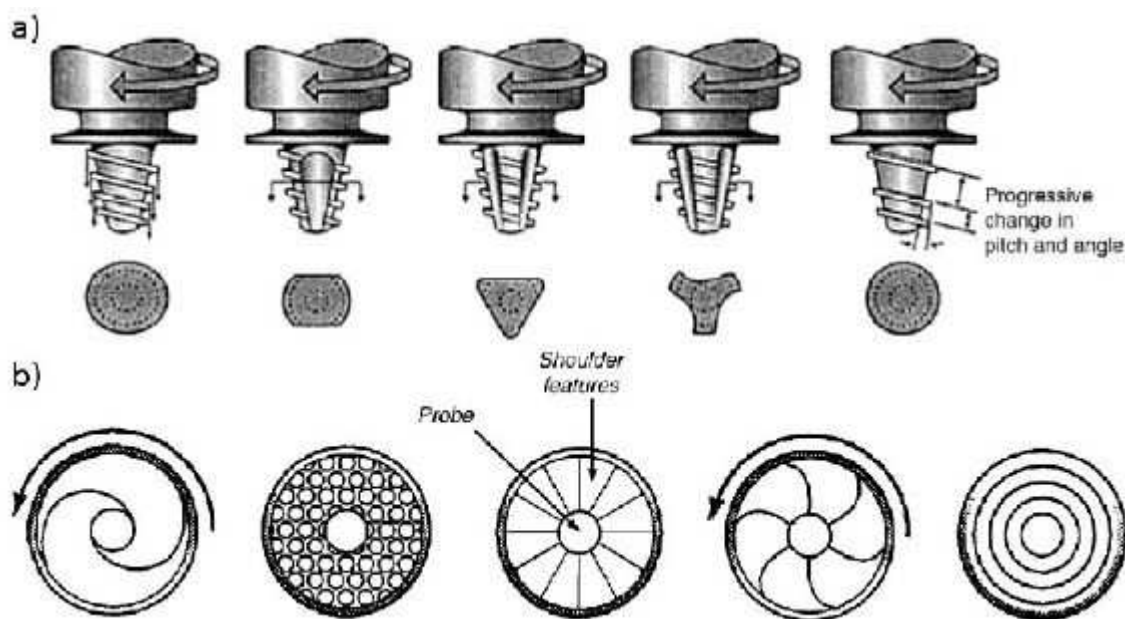


Obrázek 16: Svar zhotovený metodou FSW. DXZ - zcela zrekrytalizovaná oblast tzv. svarový nuget, TMAZ - termomechanicky ovlivněná oblast, HAZ - tepelně ovlivněná oblast, A - neovlivněný materiál.

[48]

3.6.2 Svařovací nástroj a průřez svarem

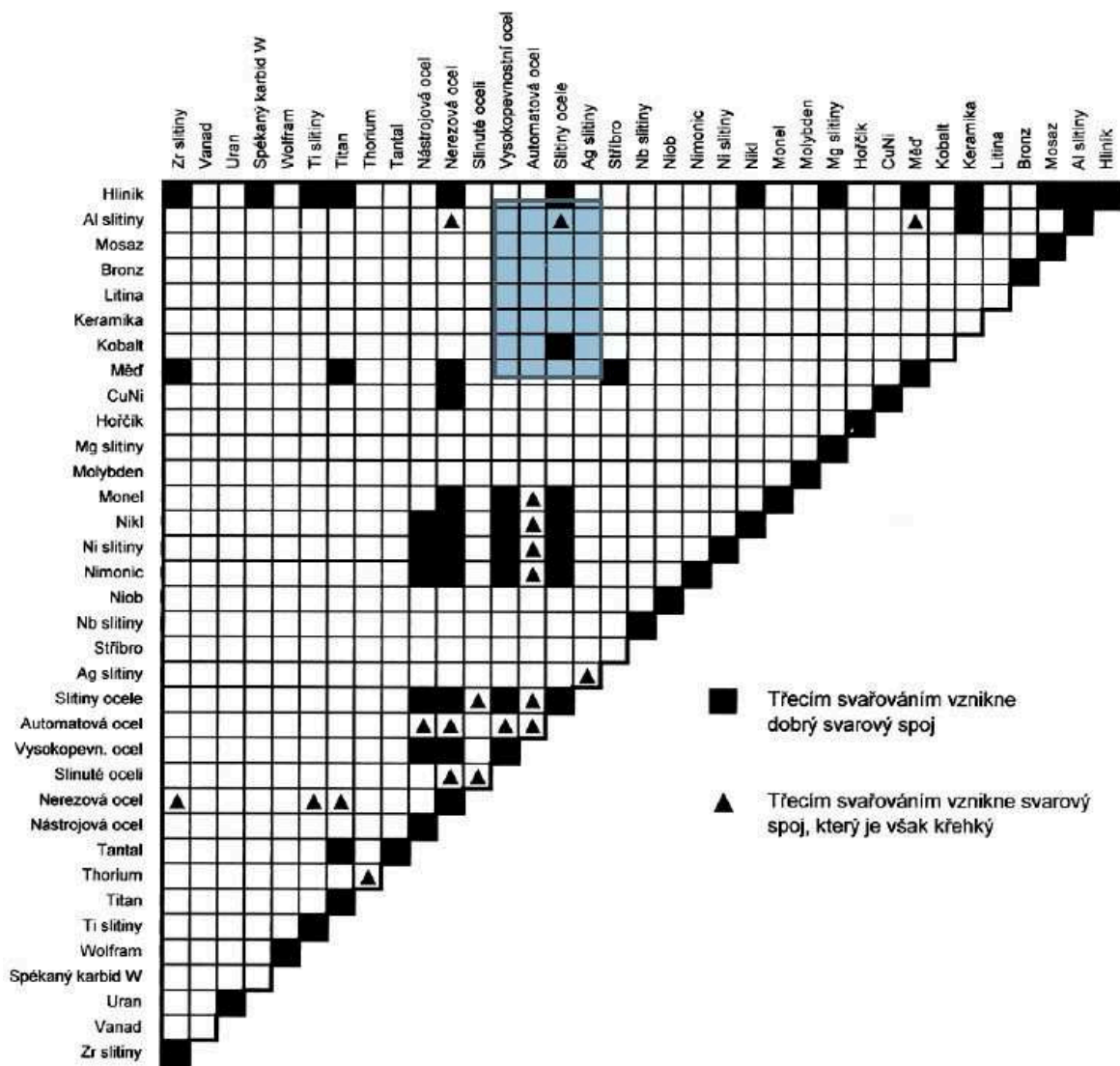
Svařovací nástroj se skládá z ramene (shoulder), které se nachází nad hrotem a hrotu nebo také trnu (pin). Rameno nástroje formuje povrch svaru. Materiál, profil a zpracování svařovacího nástroje má zásadní omezující vliv na teoretickou svařitelnost materiálů. U nástroje je požadována především velmi dobrá otěruvzdornost a také dostatečná žárupevnost. Z tohoto důvodu jsou vždy vyšší požadavky na materiál svařovacího hrotu při svařování materiálů s vyšší teplotou tavení. Teplota se při svařovacím procesu pohybuje zhruba od 70 do 90 % teploty tavení svařovaného materiálu. Působící síly jsou poměrně vysoké a nároky na nástroj pochopitelně také. Ten musí mít dále nízkou reaktivitu při pracovních teplotách, vysokou lomovou houževnatost a nízkou teplotní roztažnost. Volba materiálu nástroje závisí na svařovaném materiálu. [32]



Obrázek 17: Příklady tvarů hrotu (a) a ramene (b) [32]

3.6.3 Použití metody FSW z hlediska materiálů

V počátcích vývoje této metody bylo svařování FSW zaměřeno především na hliník a jeho slitiny. Bylo to dáno zejména jeho nízkou teplotou tavení a tím i nižšími nároky na teplotní odolnost materiálu nástroje. V současnosti se tato metoda používá i pro materiály o vyšší teplotě tání a tvrdosti. Dnes se běžně metodou FSW svařují např. slitiny hořčíku, titanu, niklu, mědi, olova a zinku. Úspěchy však již byly zaznamenány i při svařování ocelí a to i ocelí vyšší pevnosti. Metoda je velmi vhodná pro svařování vytvrditelných slitin hliníku z důvodu relativně nízké teploty svařovacího procesu. Tyto slitiny jsou považovány z hlediska tavných svařovacích metod za obtížně svařitelné (série 2000, 5000, 6000, 7000, 8000). Vytvrzující precipitáty se sice vlivem vysokého přetvoření rozbíjí, ale jejich podíl v celkovém objemu se nesníží buď vůbec nebo jen málo. U vytvrzeného materiálu pak nedojde k výraznému poklesu pevnostních charakteristik. Přehled svařovaných materiálů a jejich kombinací je uveden na následujícím obrázku. [43]



Obrázek 18: Svařitelnost kovů, jejich slitin a vzájemných kombinací metodou FSW [44]

3.6.4 Výhody a nevýhody metody FSW [43] [44]

Výhody:

- spoj má výrazně zjemnělé zrna (20 – 30× oproti ZM)
- ZM se netaví, nevzniká licí struktura ani teplé trhliny
- nedochází k propalu legur
- možno svařovat množství materiálů a jejich kombinací
- vysoká kvalita spoje s dobrými mechanickými vlastnostmi
- svarový spoj má vynikající únavové vlastnosti (neobsahuje vměstky a nečistoty)
- svařování bez PM a ochranného plynu
- technologie šetrná vůči zdraví a životnímu prostředí

- spoje jsou bez pórů, bublin, oxidických vměstků a trhlin
- vyloučení vzniku intermetalických sloučenin při svařování různorodých materiálů
- snadná automatizace
- neexistence svarové lázně umožňuje bezproblémové svařování v polohách

Nevýhody:

- nutnost řešení koncového důlku (např. výběh)
- náročnost na ustavení a upnutí
- méně flexibilní metoda ve srovnání s obloukovým svařováním
- problémy s nelineárními svary
- příčný poměr svaru méně příznivý než u tavného svařování
- mohou vzniknout studené spoje, případně trhliny za studena

3.7 Návrh vhodných metod tavného a tlakového svařování

Cílem této kapitoly bylo podat ucelený přehled jednotlivých metod používaných pro svařování hliníkových materiálů. Z výše uvedeného přehledu jsou zřejmé technologické přednosti, či naopak jistá omezení týkající se svařitelnosti vytvrditelných hliníkových slitin jednotlivými metodami.

V zadání diplomové práce je formulován požadavek na srovnání tavného a tlakového svařování hliníkových slitin z hlediska výsledných vlastností svarových spojů. V praxi se pro svařování hliníkových materiálů nejvíce používají tavné metody TIG 141 a MIG 131. Z tohoto důvodu byly vybrány pro posouzení jejich vlivu na vlastnosti svarového spoje slitiny EN AW 6082. Jako zástupce svařování tlakového byla zvolena metoda FSW. Tato poměrně nová metoda má dle mého názoru ve svařování vytvrditelných hliníkových slitin velký potenciál. Dalším důvodem volby je rovněž její zatím malé rozšíření.

4 Ověřování vlastností svarových spojů

Aby bylo možno ověřit výsledné vlastnosti svarových spojů, je třeba provést jejich zkoušky. Ty se dělí do dvou základních skupin, na destruktivní a nedestruktivní.

Destruktivní zkoušky:

- Zkoušky tvrdosti
- Zkoušky mikrotvrdosti
- Příčná zkouška tahem
- Podélná zkouška tahem
- Zkouška rázem v ohybu
- Zkouška lámavosti
- Zkouška rozlomením
- Kontrola makrostruktury
- Kontrola mikrostruktury

Nedestruktivní zkoušky:

- Vizuální kontrola
- Radiografická kontrola
- Kapilární zkouška
- Ultrazvuková zkouška
- Zkouška magnetická prášková
- Zkoušky těsnosti (např. potrubí)

Cílem zkoušení svarů zhotovených vybranými metodami je zjištění jejich vlastností po aplikaci svařování. Svary zhotovené metodami TIG 141 a MIG 131 budou po svaření navíc tepelně zpracovány. Všechny svary podrobeny následujícím zkouškám.

- Vizuální kontrola
- Kapilární zkouška
- Radiografická kontrola
- Příčná zkouška tahem

U svarů zhotovených metodou FSW budou navíc provedeny zkoušky.

- Kontrola makrostruktury
- Kontrola mikrostruktury
- Zkouška mikrotvrdosti

5 Experimentální část

Praktická část diplomové práce bude zaměřena na ověření vlastností svarových spojů vytvrditelné hliníkové slitiny EN AW 6082. Práce navazuje na bakalářskou práci „Vliv technologie svařování 141 a 131 na výsledné vlastnosti svarového spoje slitiny EN AW 6082“ [14], v níž byl ověřen předpoklad prudkého poklesu pevnostních charakteristik při svařování této slitiny nejpoužívanějšími tavnými metodami. Primárním cílem diplomové práce je návrh, provedení a ověření takových postupů, které by tento nežádoucí jev eliminovaly nebo alespoň výrazně potlačily. Po svařování této slitiny tavnými metodami bude provedeno tepelné zpracování zkušebních dílců. Jinou možností, jak zabránit poklesu pevnosti, je využití tlakových metod svařování, konkrétně metody FSW.

5.1 Základní materiál a jeho charakteristika

Svařovaný základní materiál je vytvrditelná hliníková slitina EN AW 6082 (AlSi1MgMn). Svařitelnost materiálu je dobrá, s přihlédnutím k riziku snížení pevnostních vlastností vlivem svařování. Slitina je vhodná pro eloxování a má také dobrou obrobitelnost. Využívá se např. ve výrobě lodí, letadel a kolejových vozidel. Hlavními legujícími prvky jsou hořčík a křemík. Tento typ slitiny má při nízkém obsahu mědi rovněž dobrou korozní odolnost. Železo je zde v rozsahu $0,1 \div 0,5$ % pokládáno za příměs mírně zvyšující pevnost, zjemňující zrna a snižující rekrystalizační teplotu. Obsah křemíku ve slitině je vyšší, než odpovídá složení fáze Mg_2Si . Takový typ slitin má optimální mechanické vlastnosti, výbornou pevnost a tažnost. Přesné chemické složení je uvedeno v tabulce 5, mechanické vlastnosti pak v tabulce 4. V tabulkách jsou vždy uvedeny obvyklé charakteristiky slitiny EN AW 6082. Hned pod nimi jsou pak hodnoty téhož materiálu konkrétní tavby, který byl použit při svařování zkušebních dílců. Opis hutního

atestu je v příloze. Uvedené hodnoty mechanických vlastností platí pro pokojovou teplotu.
[15]

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti slitiny EN AW 6082.T6

	Tvrdość podle Brinella	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅ [%]
Obecné charakteristiky	95	295	240	8
Tavba č. 01/0055952/3	-	336 - 341	279 - 283	18

Tabulka 5: Chemické složení slitiny EN AW 6082.T6

	Značka prvku	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Chemické složení podle EN 573-3	Obsah v hm. [%]	0,7	max.	max.	0,4	0,6	max.	max.	max.
		-	0,50	0,10	-	-	0,25	0,20	0,10
		1,3			1,0	1,2			
Tavba č. 01/0055952/3	Obsah v hm. [%]	0,9	0,42	0,07	0,45	0,8	0,02	0,06	0,03

Doplňková značka za tečkou v označení slitiny EN AW 6082.T6 označuje stav tepelného zpracování. Značka T6 udává, že dodaný materiál je ve stavu po rozpouštěcím žíhání a po umělém stárnutí.

5.2 Tavné svařování slitiny EN AW 6082

Jako zástupci tavného svařování byly zvoleny metody TIG 141 a MIG 131. Každou metodou byl svařen jeden zkušební kus. U obou metod šlo o ruční svařování.

5.2.1 Charakteristika přídavného materiálu

Pro svařování zkušebních dílců byl použit přídavný materiál firmy ESAB. Ke svařování metodou TIG byl s ohledem na použitý základní materiál zvolen drát OK TIGROD 5087 (AlMg4,5MnZr). Tento materiál je vhodný pro svařování slitin hliníku s maximálním obsahem hořčíku 5 % a také je-li požadována vyšší pevnost v tahu. Přísada

zirkonu zvyšuje odolnost svarového kovu vůči teplým trhlinám. Mechanické vlastnosti při pokojové teplotě jsou uvedeny v tabulce 6, chemické složení v tabulce 7.

Tabulka 6: Typické mechanické vlastnosti čistého svarového kovu

KV při 20 °C [J]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅ [%]
35	280	130	30

Tabulka 7: Typické chemické složení čistého svarového kovu

Značka prvku	Al	Zr	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Obsah v hm. [%]	zbytek	0,15	< 0,25	< 0,40	< 0,05	0,9	4,9	0,15	< 0,25	< 0,15

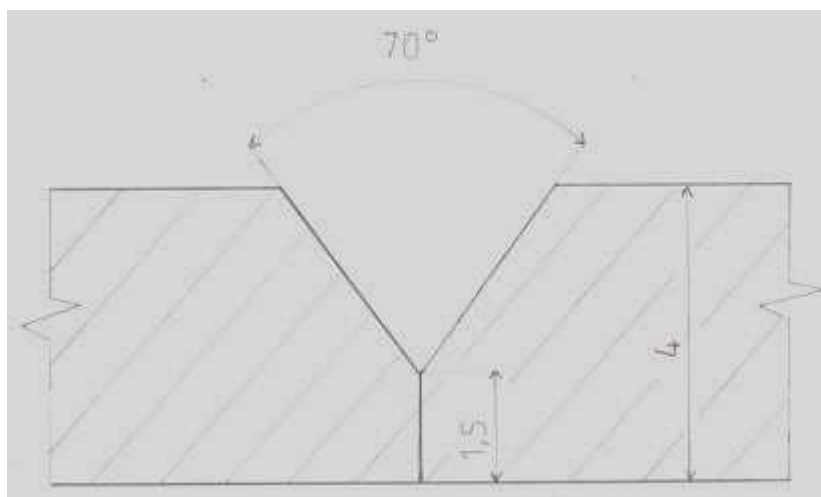
Pro svařování metodou MIG byl použit drát OK AUTROD 5087 (AlMg4,5MnZr). Přídavný materiál je svým chemickým složením a mechanickými vlastnostmi totožný s materiálem použitým u metody TIG. Platí pro něj tedy hodnoty uvedené v tabulce 6 a tabulce 7.

5.2.2 Příprava dílců ke svařování

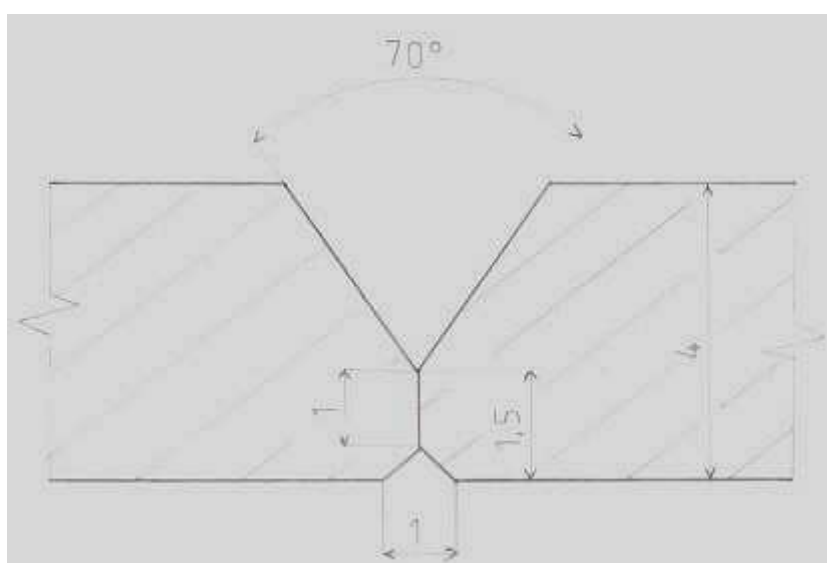
Pro svařování byl použit základní materiál tloušťky $t = 4$ mm. Rozměry svařovaných dílců byly 300×125 mm. Úprava svarových ploch je vyznačena na obrázku 19 pro svařování MIG a na obrázku 20 pro svařování TIG. Jejich příprava byla provedena mechanicky:

- řezáním
- frézováním

Čištění povrchu svařovaného materiálu bylo provedeno rovněž mechanicky. Oxidická vrstva byla očištěna ocelovým kartáčem do šířky 20 mm na každou stranu od budoucího svaru. Svarové plochy byly dále důkladně odmaštěny. Svařování každého vzorku bylo zahájeno vždy nejpozději do třiceti minut po jeho očištění. Z důvodu zamezení deformacím a zajištění správné polohy svařovaných dílů byl použit upínací přípravek.



Obrázek 19: Úprava svarových ploch – svařování MIG



Obrázek 20: Úprava svarových ploch – svařování TIG

svarová mezera	$b = 0 \text{ mm}$
otupení	$c = 1,5 \text{ mm}$
sražení spodní hrany	$a = 0,5 \text{ mm}$
úhel otevření	$\alpha = 70^\circ$

Sražení spodní hrany se týká pouze svařování metodou TIG, u metody MIG nebylo provedeno. Spodní hrana se upravuje z důvodu lepšího formování kořene svaru.

5.2.3 Svařování TIG

V tomto oddíle jsou uvedeny základní údaje o svařování metodou TIG a hodnoty svařovacích parametrů. Tupý V-svar byl proveden na dvě vrstvy. Doporučené parametry

pro svařování tupého V-svaru se všemi detaily jsou uvedeny v příloze ve WPS. Konkrétní hodnoty zaznamenané přímo v průběhu svařování jsou zaznamenány v následující tabulce.

- svařovací proud – v zapojení AC
- ochranný plyn dle ČSN EN ISO 14 175 II, I3

Tabulka 8: Parametry svařování - metoda TIG

Svařovací parametry – svařování TIG 141	
Svařovací proud [A]	190 – 195
Svařovací napětí [V]	15,2
Rychlost svařování [cm/min]	15
Průměr přídavného drátu	Ø 1,6 mm – kořenová housenka
	Ø 2,4 mm – krycí housenka
Průměr wolframové elektrody	Ø 2,4 mm
Poloha svařování	PA
Předeřev	Bez předeřevu
Druh wolframové elektrody	WC 20
Ochranný plyn	Argon – Ar 4.8 (výrobce Messer)
Průtok ochranného plynu [l/min]	13

Použitý ochranný plyn Ar 4.8 má čistou 99,998 %. Ke svařování byl použit zdroj svařovacího proudu FRONIUS MAGIC WAVE 2200 JOB. Svařovalo se v pulzním režimu.

5.2.4 Svařování MIG

V tomto oddíle jsou uvedeny základní údaje o svařování metodou MIG a hodnoty svařovacích parametrů. Tupý V-svar byl proveden na jednu vrstvu. Doporučené parametry pro svařování tupého V-svaru se všemi detaily jsou uvedeny v příloze ve WPS. Konkrétní hodnoty zaznamenané přímo v průběhu svařování jsou zaznamenány v následující tabulce.

- svařovací proud - zapojení DC (+)
- ochranný plyn dle ČSN EN ISO 14 175 II, I3

Tabulka 9: Parametry svařování - metoda MIG

Svařovací parametry – svařování MIG 131	
Svařovací proud [A]	140
Svařovací napětí [V]	19,5
Rychlost svařování [cm/min]	50
Průměr přídatného drátu	Ø 1,2 mm
Poloha svařování	PA
Přehřev	Bez přehřevu
Ochranný plyn	Argon – Ar 4.8 (výrobce Messer)
Průtok ochranného plynu [l/min]	15

K ochraně svarové lázně při svařování metodou MIG byl využit stejný ochranný plyn jako u metody TIG. Ke svařování byl použit zdroj svařovacího proudu FRONIUS TRANSPULS SYNERGIC 4000. Svařovalo se v pulzním režimu.

5.2.5 Tepelné zpracování

Po svaření a provedení potřebných NDT kontrol byly oba svařence tepelně zpracovány. To se provádělo na základě již ověřeného předpokladu výrazného poklesu pevnostních charakteristik svařované slitiny EN AW 6082 v oblasti TOO. K poklesu pevnosti svarového spoje v této oblasti došlo vlivem rozpuštění precipitátu. Vhodným tepelným zpracováním má být precipitát v potřebném množství opět obnoven. Předpokládá se zvýšení meze pevnosti a smluvní meze kluzu na hodnoty blízké hodnotám u základního materiálu před aplikací svařování.

Vytvrzování hliníkových slitin je možno rozdělit do tří fází. Nejdříve je nutno uskutečnit rozpouštěcí žíhání, tj. ohřev na vhodnou rozpouštěcí teplotu a výdrž na této teplotě po dobu nutnou k převedení intermetalických fází do tuhého roztoku. Další fází je kalení, kdy se slitina prudce ochladí. Potřebná je kritická nebo nadkritická rychlost ochlazování z rozpouštěcí teploty pro získání přesyceného tuhého roztoku α . Důležitá je proto volba vhodného kalicího média a také rychlost proudění. Poslední fází vytvrzování je stárnutí slitiny. Zde dochází v důsledku změn substrukтуры ke změnám mechanických a technologických vlastností. Podstatná je teplota při níž stárnutí probíhá a také doba vytvrzování. Slitiny typu Al-Mg-Si je potřeba vytvrzovat za použití umělého stárnutí,

přirozeným stárnutím totiž není možno u těchto typů slitin dosáhnout vysokých pevnostních vlastností. [15]

Při kalení do vody je třeba počítat s tím, že při ponoření materiálu, který má mnohem vyšší teplotu, než je teplota bodu varu vody se na povrchu materiálu začne tvořit pára. Tu je třeba průběžně odstraňovat, je proto nutná cirkulace vody jakožto kalícího média. Rychlost ochlazování z teploty rozpouštěcího žíhání má negativní vliv na zbytkové pnutí v materiálu a také na korozní vlastnosti. [15]

Teplota rozpouštěcího žíhání je 500 – 540 °C. Slitiny s vyšším přebytkem Si je nutno ochlazovat ve vodě. Umělé stárnutí se provádí při teplotách 160 – 180 °C. Doba prodlevy na této teplotě se u slitin typu Al-Mg-Si obvykle pohybuje v rozmezí 8 – 12 hodin. Slitiny jsou citlivé na přestávku mezi ochlazením z teploty rozpouštěcího žíhání a započítáním umělého stárnutí z hlediska získání maximálních pevnostních vlastností. Doporučuje se umělé stárnutí realizovat buď ihned po ochlazení z teploty rozpouštěcího žíhání, nebo až po delší době, např. po 10 hodinách. [15]

Svařené díly byly žíhány v peci PK 55/12. Teplota byla měřena kalibrovaným termočlánkem umístěným na žíhaném materiálu.

Postup při žíhání zkušebních vzorků slitiny EN AW 6082:

• rozpouštěcí teplota	520 °C
• doba rozpouštěcího žíhání	40 min
• kalící médium	voda (cirkulace)
• teplota kalícího média	20 °C
• prodleva mezi kalením a stárnutím	bez prodlevy
• teplota umělého stárnutí	170 °C
• doba stárnutí	10 h

5.3 Tlakové svařování slitiny EN AW 6082 metodou FSW

Svařování zkušebních dílců metodou friction stir welding se uskutečnilo ve Výzkumném ústavu zvaračském v Bratislavě. Původně mělo být svařeno 8 zkušebních svarů při různých svařovacích rychlostech a otáčkách. Po dokončení svaru číslo 7 však bylo rozhodnuto další testy ukončit z důvodu nevyhovujících výsledků počínaje svarem číslo 5 a rizika poškození nástroje. Podrobnější informace jsou uvedeny níže.

5.3.1 FSW - příprava dílů a základní údaje

Svařování proběhlo na zařízení firmy Beijing FSW Technology Co., Ltd. Nástroj, na který jsou u metody FSW kladeny značné nároky (řešeno v kapitole 3.7), byl vyroben z nástrojové oceli a dále tepelně zpracován zušlechťením. Pro daný materiál a také pro jeho rozdílné tloušťky je klíčová geometrie nástroje. Jedná se o reliéf nástroje, průměr ramena, délku, tvar a průměr hrotu.



Obrázek 21: Použitý svařovací nástroj

Jelikož dochází při svařování metodou FSW ke vzniku poměrně velkých sil, zejména při vyšších otáčkách a rychlostech posuvu, je třeba dbát na pevné upnutí svařovaných dílů.



Obrázek 22: Upnutí svařovaných dílů v přípravku

Pro svařování byl použit stejný základní materiál jako u předešlých metod. Tloušťka materiálu byla $t = 4\text{ mm}$ a rozměry dílců $300 \times 125\text{ mm}$. Na každém z dílů, s výjimkou posledního, byly provedeny 2 svary o délce 130 mm . Jako vhodný typ svaru byl zvolen tupý I-svar, svařovalo se bez PM a bez svarové mezery. Příprava dílců byla provedena mechanicky, řezáním a obroušením nerovností a otřepů. Před svařováním byl materiál v místě budoucího svaru a vedle něj očištěn ocelovým kartáčem a také odmaštěn.

5.3.2 FSW - parametry svařování

Tupý I-svar byl svařen na jeden průchod nástroje. Svařování je možno rozdělit do tří fází. První spočívá v zanoření nástroje do materiálu. Hloubka zanoření je předem definována operátorem zařízení. Musí být dostačující tak, aby byl hrot nástroje úplně zanořen v materiálu až po čelo nástroje. Ve spodní části svaru musí být ponechána dostatečná rezerva v materiálu (ve směru osy z) z důvodu správného formování kořene. Po zanoření nástroje do materiálu se spustí posuv a zahájí se vlastní svařování. Po jeho ukončení se nástroj z materiálu vysune, zůstává po něm charakteristický důlek. V praxi je proto nutné použít výběh svaru.

Tabulka 10: Parametry svařování - metoda FSW

Svařovací parametry – FSW	
Velikost otáček [ot./min]	600 (vzorky č. 1 - 4)
	800 (vzorky č. 5 - 7)
Rychlost svařování [cm/min]	6 (vzorek č. 1)
	12 (vzorek č. 2)
	18 (vzorek č. 3)
	24 (vzorek č. 4)
	24 (vzorek č. 5)
	30 (vzorek č. 6)
	16 (vzorek č. 7)
Hloubka zanoření [mm]	3,5
Náklon nástroje [°]	0
Rychlost zanořování [mm/s]	3
Přídavný materiál	Bez PM
Poloha svařování	PA
Předehřev	Bez předehřevu
Ochranný plyn	Bez ochranného plynu

Při svařování metodou FSW téměř nedochází k vývinu svářečských dýmů a par. Metoda je velmi šetrná k životnímu prostředí a ke zdraví svářeče. Odsávání nebylo nutno používat. K minimálnímu vývinu dýmů a par došlo teprve při vyšších otáčkách.

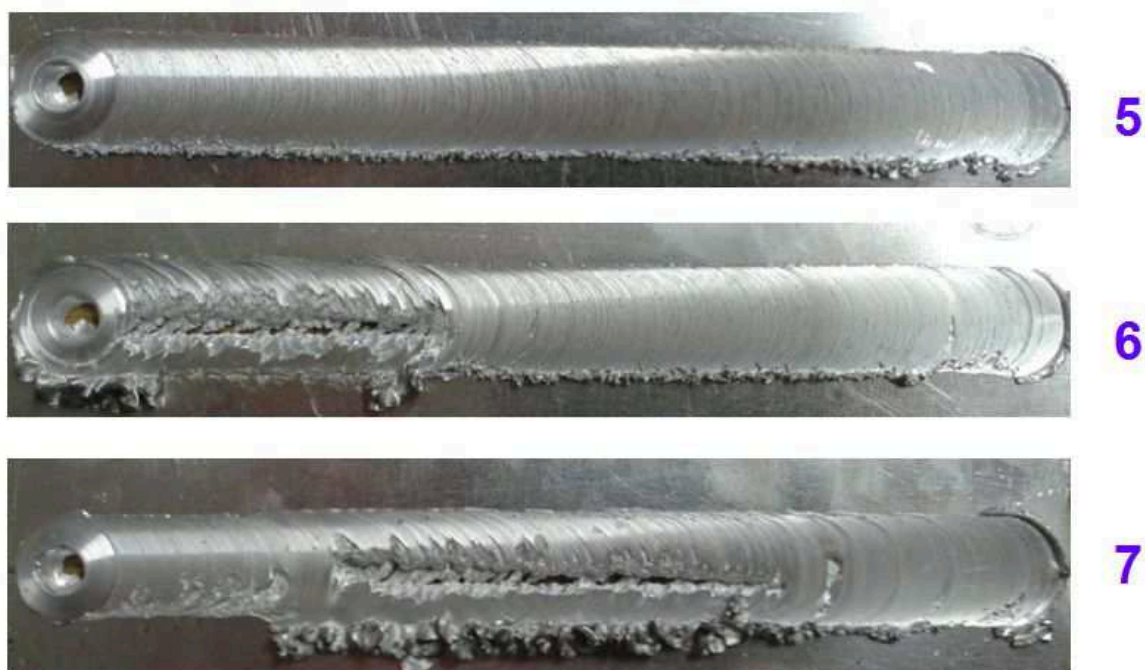
5.3.3 FSW - jednotlivé vzorky

Podle původního předpokladu mělo být svařeno metodou FSW 8 zkušebních svarů při různých svařovacích rychlostech a otáčkách. Počínaje svarem 5 měly všechny svary nevyhovující kvalitu. Po dokončení zkušební kusu číslo 7 bylo rozhodnuto další testy ukončit, jelikož hrozilo riziko poškození nástroje. Vady však nebyly způsobeny velikostí otáček ale tím, že materiál měl cca o 0,15 mm menší tloušťku než deklarované 4 mm. Při svařování se to projevovalo občasným pískáním.



Obrázek 23: Ukázky povrchů zkušebních vzorků č. 1-4 svařovaných při 600 ot./min

Zkušební kusy 1 až 4 se svařovaly při otáčkách vřetene 600 ot./min. Výsledky byly vyhovující pro všechny rychlosti svařování.



Obrázek 24: Ukázky povrchů zkušebních vzorků č. 5-7 svařovaných při 800 ot./min

Zkušební kusy 5 až 7 byly svařovány při otáčkách 800 ot./min. Výsledky nevyhovovaly u všech vzorků. Pouze dílec číslo 5 měl vyhovující povrch, kořen však vykazoval nepřípustné vady.

6 Zkoušky svarových spojů a dosažené výsledky

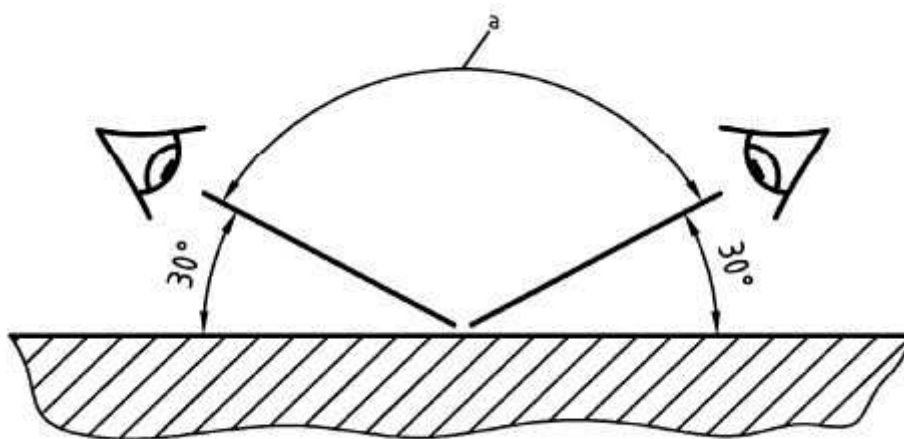
Pro ověření vlastností svarových spojů a posouzení vlivu svařování zvolenými tavnými a tlakovými metodami na hliníkovou slitinu EN AW 6082 je nutné uskutečnit potřebné zkoušky. Jelikož je tato slitina vytvrzená, bude zde primární posouzení vlivu svařování na její pevnostní charakteristiky. Jedná se zejména o příčnou zkoušku tahem a u svarů zhotovených metodou FSW navíc také o zkoušku mikrotvrdosti. Zvolené nedestruktivní zkoušky jsou pak nutným doplňkem umožňujícím zjistit případné vady ve svaru. Tyto vady by totiž mohly negativně ovlivnit výsledek tahové zkoušky, čímž by došlo ke zkreslení výsledků. Kontrola makrostruktury a mikrostruktury byla opět provedena pouze u svarů zhotovených metodou FSW. Cílem bylo získání doplňkových informací o struktuře svarových spojů provedených touto nekonvenční svařovací metodou.

6.1 Vizuální kontrola svarů (VT)

Vizuální kontrola byla provedena u všech zkušebních svarů v rozsahu 100 %. Kontrola byla uskutečněna v souladu s normou ČSN EN ISO 17637. Společně s touto normou byly k hodnocení použity další normy:

- ČSN EN ISO 10042 – zvolený stupeň kvality B
- ČSN EN ISO 6520-1 – klasifikace vad pro tavné svařování

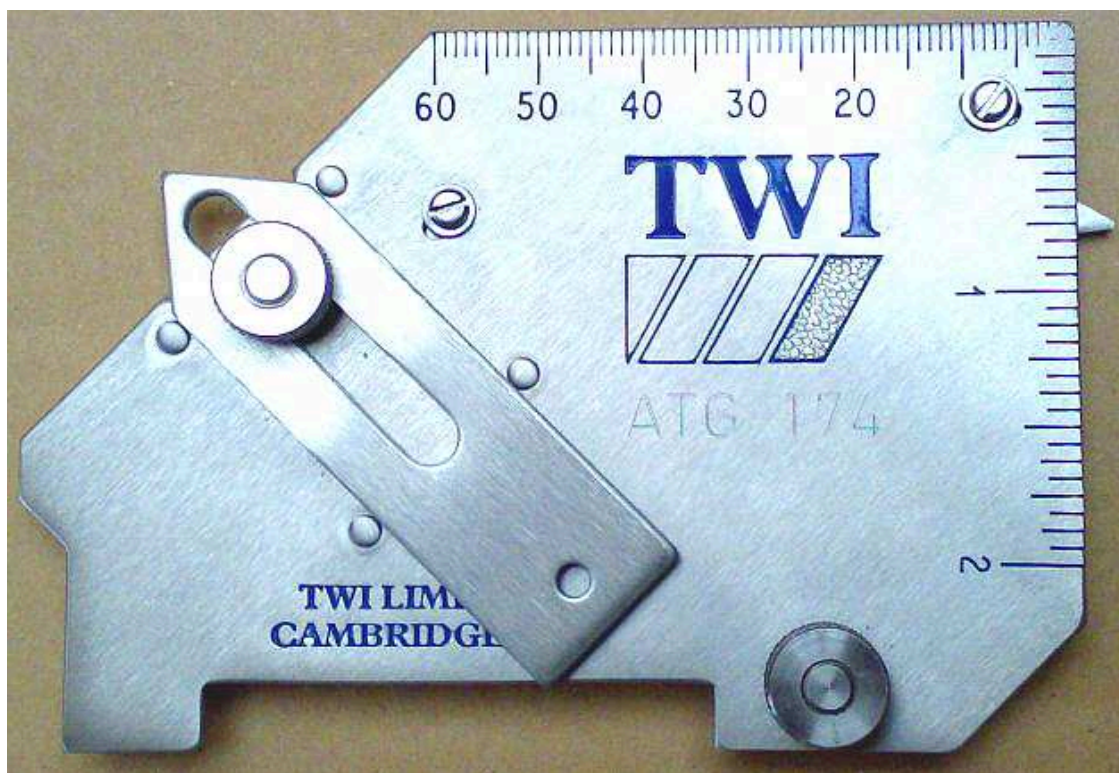
Kvalita svarových spojů byla posuzována přímou vizuální kontrolou. Pro provedení této kontroly je nezbytné osvětlení povrchu svaru nejméně 350 lx, doporučuje se však 500 lx. Pro osvětlení byla použita halogenová lampa o výkonu 500 W. Naměřená intenzita osvětlení dosahovala 550 lx, změřeno luxmetrem LX 101. Vzdálenost oka od kontrolovaného předmětu nesmí být větší než 600 mm a současně nesmí být úhel pozorování menší než 30 °.



Obrázek 25: Přímá vizuální kontrola. Značka a znázorňuje povolený rozsah úhlu pozorování. [34]

Pro měření byly dále použity:

- posuvné měřítko
- svinovací metr
- víceúčelová měrka (Cambridge – Type)



Obrázek 26: Víceúčelová měrka Cambridge

Výsledky vizuální kontroly provedené na jednotlivých vzorcích jsou zaznamenány v následující tabulce. Přesné údaje jsou uvedeny v přílohách v protokolech o zkoušce.

Tabulka 11: VT – vyhodnocení vzorků

Vzorek	Hodnocení	Název vady	Číslo vady	Umístění [mm]
TIG	vyhovuje	-	-	-
MIG	vyhovuje	-	-	-
FSW 1	vyhovuje	-	-	-
FSW 2	vyhovuje	-	-	-
FSW 3	vyhovuje	-	-	-
FSW 4	vyhovuje	-	-	-

6.2 Kapilární zkouška (PT)

Pomocí kapilární zkoušky lze s poměrně velkou citlivostí odhalit povrchové vady nebo vady související s povrchem. Při provádění této zkoušky je zapotřebí nejprve důkladně očistit a osušit povrch. V další fázi se na očištěný povrch nanese penetrant (byl použit Pfinder 860) a nechá se působit po předem stanovenou dobu. Po uplynutí příslušné penetrační doby se přebytky penetrantu na povrchu odstraní omytím a povrch se osuší. Následuje poslední fáze, kdy se nanesením vývojky (Pfinder 870) vyvolají indikace. Tyto se hodnotí vizuálně.

Kapilární (penetrační) zkouška byla provedena opět u všech vzorků. Kontrola se prováděla v rozsahu 100 % a byla uskutečněna v souladu s normou ČSN EN ISO 3452-1. Použitá metoda dle této normy má označení IICd. To znamená, že byl použit barevný kontrastní penetrant odstranitelný rozpouštědlem, vývojka byla bezvodá na bázi rozpouštědla. Svary se vyhodnocovaly podle normy ČSN EN ISO 10042, zvolený stupeň jakosti B. Byla použita metoda barevné indikace.

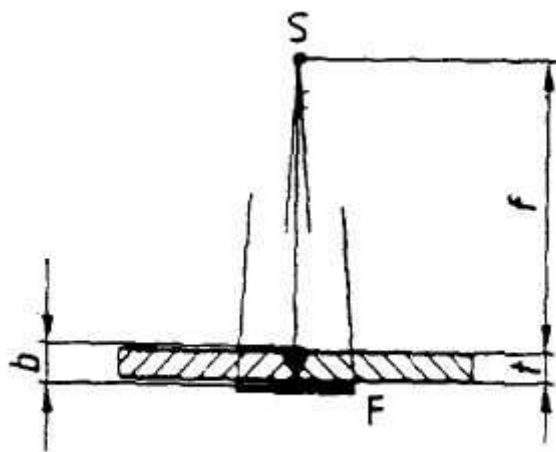
Výsledky penetrační zkoušky provedené na jednotlivých vzorcích jsou zaznamenány v následující tabulce. Podrobné údaje jsou uvedeny v přílohách v protokolech o zkoušce.

Tabulka 12: PT – vyhodnocení vzorků

Vzorek	Hodnocení	Název vady	Číslo vady	Umístění [mm]
TIG	vyhovuje	-	-	-
MIG	vyhovuje	-	-	-
FSW 1	vyhovuje	-	-	-
FSW 2	vyhovuje	-	-	-
FSW 3	vyhovuje	-	-	-
FSW 4	vyhovuje	-	-	-

6.3 Radiografická kontrola (RT)

Radiografie patří do skupiny radiologických (prozařovacích) metod. Jedná se o nejrozšířenější metodu kontroly prozářením. Princip spočívá v průchodu záření o velmi vysoké energii, nejčastěji RTG paprsků, kontrolovaným materiálem. V místech vad dochází ke změně intenzity prošlého záření. Tyto vady se indikují na detektoru. Při použití radiografické metody se jako detektor používá fotografický film, vady se zde projeví jako světlejší nebo naopak tmavší místa na radiogramu.



Obrázek 27: Princip radiografické kontroly, S – zdroj záření, F – film, b – vzdálenost objekt-film, t – jmenovitá tloušťka, f – vzdálenost zdroj-objekt

Radiografická kontrola byla opět provedena na všech vzorcích. Kontrola se prováděla v rozsahu 100 % v souladu s normou ČSN EN ISO 17636-1. Kvalita snímku byla ověřena použitím drátkových měrek. Svary byly vyhodnoceny podle normy ČSN EN 12517-2, zvolený stupeň přípustnosti 1.

Výsledky radiografických zkoušek provedených na jednotlivých vzorcích jsou zaznamenány v následující tabulce. Přesné údaje jsou uvedeny v přílohách v protokolech o zkoušce.

Tabulka 13: RT – vyhodnocení vzorků

Vzorek	Hodnocení	Název vady	Číslo vady	Umístění [mm]
TIG	vyhovuje	-	-	-
MIG	vyhovuje	-	-	-
FSW 1	vyhovuje	-	-	-
FSW 2	vyhovuje	-	-	-
FSW 3	vyhovuje	-	-	-
FSW 4	vyhovuje	-	-	-

6.4 Makroskopická a mikroskopická kontrola svarových spojů

Tyto destruktivní zkoušky se používají zejména k posouzení stavu struktury svarového spoje. Makroskopická kontrola zkušební vzorku se provádí buď pouhým okem nebo při malém zvětšení, v naleptaném nebo nenaleptaném stavu. Kontrola mikroskopická se provádí obdobně, ale při až 500 násobném zvětšení.

Hodnocení makrostruktury a mikrostruktury se uskutečnilo pouze na vzorcích svařovaných metodou FSW. Rozměry vzorků o velikosti 25 × 15 mm se odebíraly příčně k ose svaru, nařezáním pásovou pilou Bomar. Vzorky pro metalografické zkoušky musí obsahovat svarový nuget, obě termomechanicky ovlivněné oblasti, obě tepelně ovlivněné oblasti a neovlivněný základní materiál. Z důvodu rizika smytí označovače leptadlem, byly řezy označeny vrypy jehlou.

Makroskopická a mikroskopická kontrola byla provedena dle normy ČSN EN 1321. Nařezané vzorky byly broušeny a leštěny na brusném papíru za mokra na zařízení firmy Struers. Zrnitost použitého brusného papíru byla 500. Jelikož je zkoušená hliníková slitina poměrně měkká, byl materiál broušen přímo na brusném papíru finální zrnitosti. Po broušení následoval oplach vodou a vysušení vzorků. Byla uskutečněna metalografická

příprava, použita metoda kolmého řezu se zaléváním za studena. Pro naleptání vzorků se použilo leptadlo Adler. Leptalo se ponořením výbrusu do leptadla. Doba leptání byla 5 až 10 sekund. Následoval oplach vodou a sušení. Posledním krokem bylo pořízení fotografií digitálním fotoaparátem. Fotografovalo se bez zvětšení, to bylo provedeno dodatečně s využitím počítačové podpory v měřítku 7:1.

Svarová spojení všech vzorků jsou bez viditelných vad, například trhlin, pórů, neprůvarů apod. To dokladuje vhodnost zvolené technologie pro svařování hliníkové slitiny EN AW 6082 a také správnost použitých parametrů.



Obrázek 28: Makrostruktura svarového spoje, vzorek FSW1



Obrázek 29: Makrostruktura svarového spoje, vzorek FSW2



Obrázek 30: Makrostruktura svarového spoje, vzorek FSW3

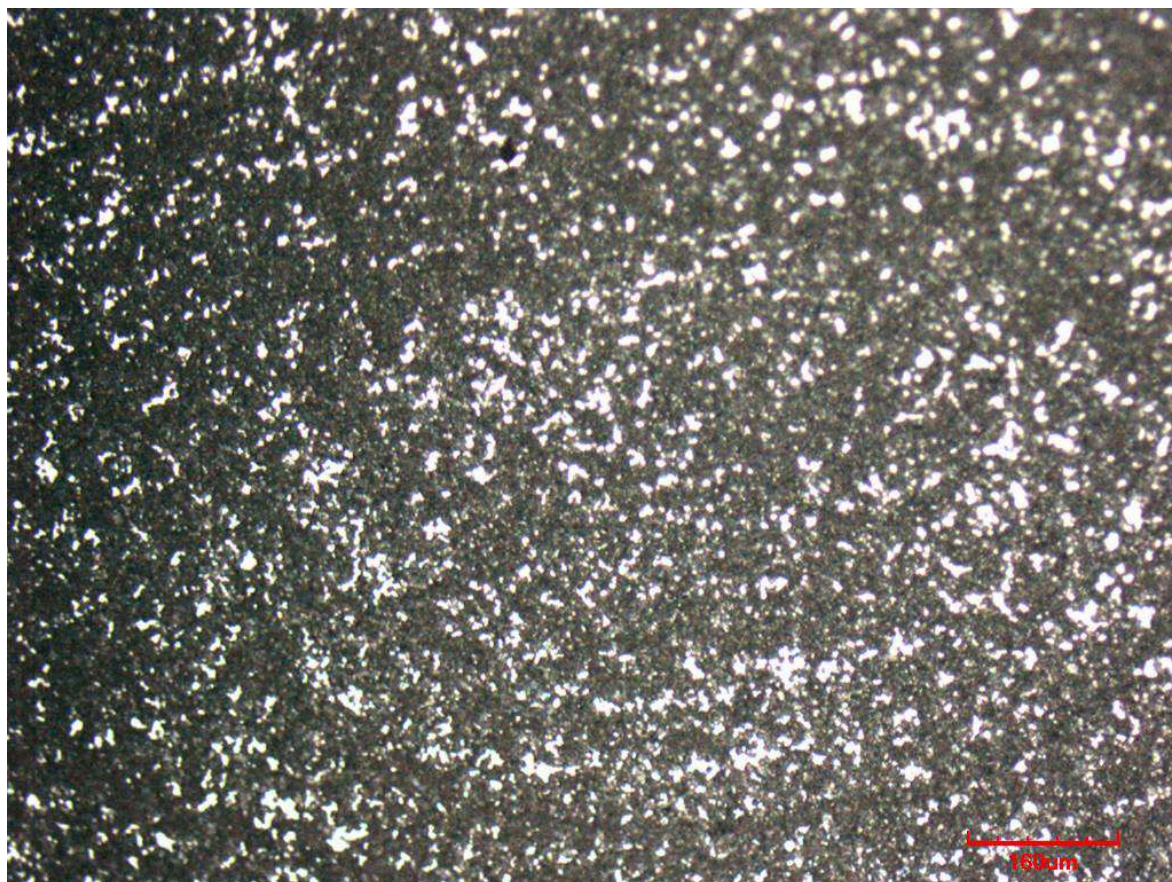


Obrázek 31: Makrostruktura svarového spoje, vzorek FSW4

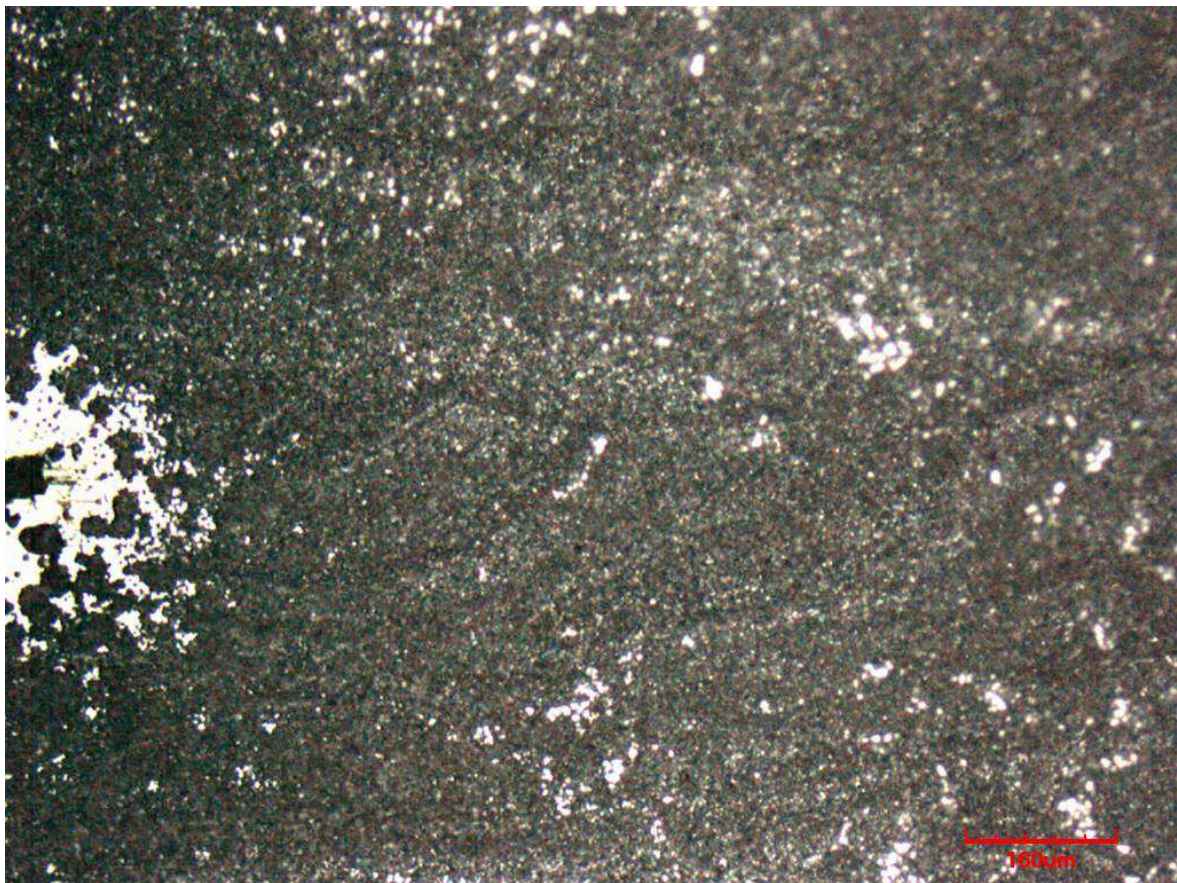
Tabulka 14: Zkouška makrostruktury – vyhodnocení vzorků

Vzorek	Hodnocení
FSW 1	bez vad
FSW 2	bez vad
FSW 3	bez vad
FSW 4	bez vad

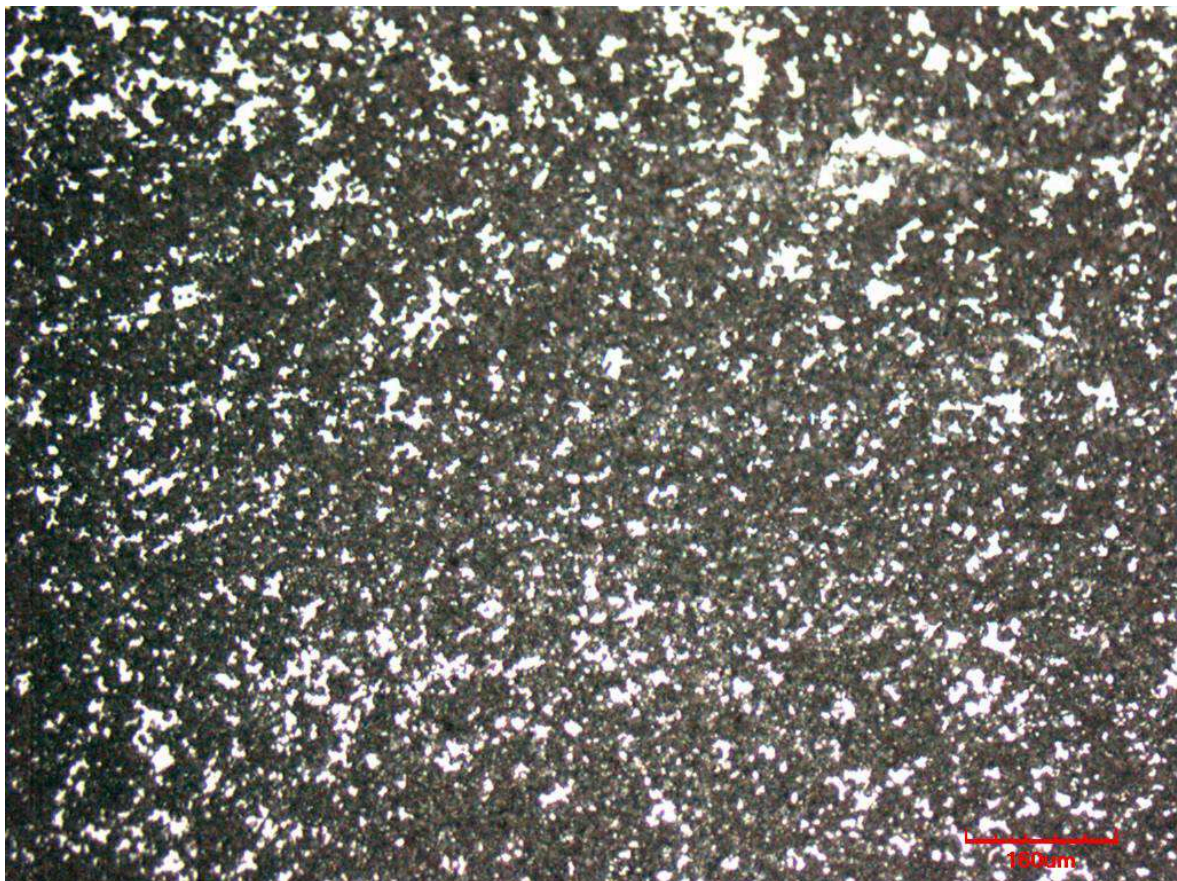
Na následujících obrázcích je zobrazena mikrostruktura dynamicky rekrystalizované zóny, tzv. svarového nugetu u jednotlivých vzorků. Materiál je v této oblasti silně deformován. Má globulitickou strukturu zrna s různým charakterem v oblastech přetváření svařovacím nástrojem. Svarový spoj má charakter litého/tvářeného materiálu.



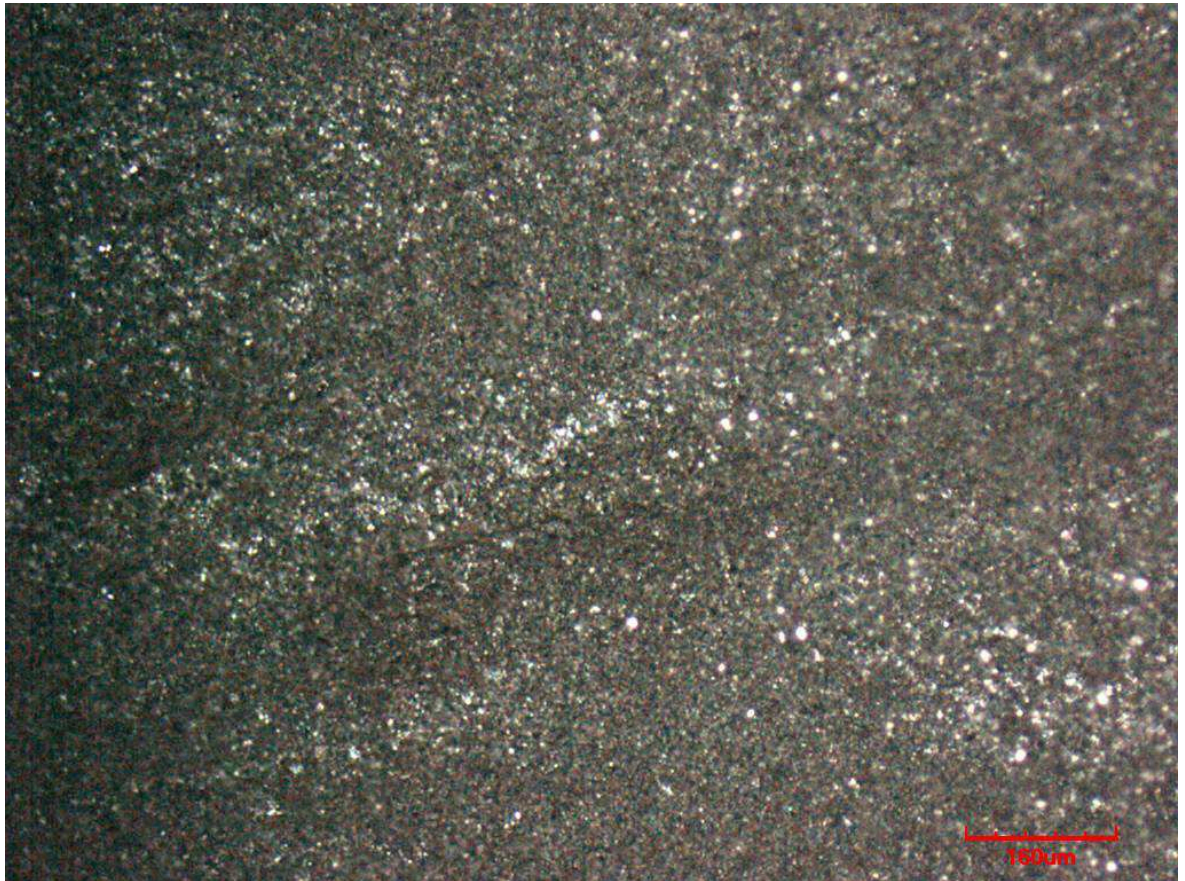
Obrázek 32: Mikrostruktura vzorku FSW 1 – oblast svarového nugetu



Obrázek 33: Mikrostruktura vzorku FSW 2 – oblast svarového nugetu



Obrázek 34: Mikrostruktura vzorku FSW 3 – oblast svarového nugetu



Obrázek 35: Mikrostruktura vzorku FSW 4 – oblast svarového nugetu

Pro leptání bylo použito činidlo Adler-Matting, které je vhodné pro vyvolání makrostruktury, ale méně již pro zviditelnění struktury zrn. Pro lepší zviditelnění této struktury je u slitin hliníku vhodnější použít Kellerovo a Weckovo činidlo.

6.5 Měření mikrotvrdosti

Mikrotvrdost byla měřena mikrotvrdoměrem se zatížením 0,98 N (symbol tvrdosti podle Vickerse HV 0,1) v souladu s normou ČSN EN ISO 9015-2. Zvolená vzdálenost vpichů byla 1 mm. Měření mikrotvrdosti bylo prováděno na příčných řezech a vedeno středem zkoušených vzorků skrz všechny oblasti svarového spoje. Této zkoušce byly podrobeny pouze vzorky svařované metodou FSW. Hodnoty tvrdosti jsou uvedeny v tabulce a vyneseny do grafů. Bod 0 značí střed svaru, záporné hodnoty udávají směr vlevo od středu svaru, kladné směr opačný.

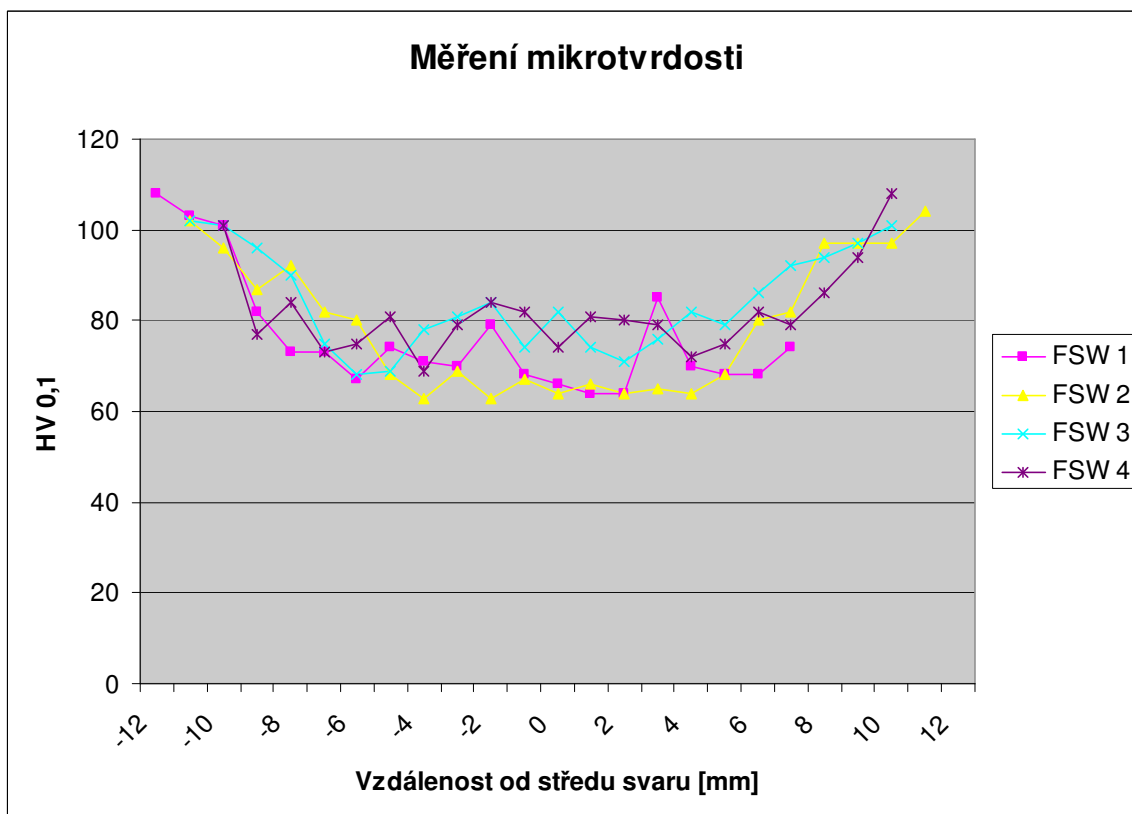
Tabulka 15: Měření mikrotvrdostí jednotlivých vzorků HV 0,1

Vzdálenost [mm]	HV			
	FSW 1	FSW 2	FSW 3	FSW 4
-12	108			
-11	103	102	102	
-10	101	96	101	101
-9	82	87	96	77
-8	73	92	90	84
-7	73	82	75	73
-6	67	80	68	75
-5	74	68	69	81
-4	71	63	78	69
-3	70	69	81	79
-2	79	63	84	84
-1	68	67	74	82
0	66	64	82	74
1	64	66	74	81
2	64	64	71	80
3	85	65	76	79
4	70	64	82	72
5	68	68	79	75
6	68	80	86	82
7	74	82	92	79
8		97	94	86
9		97	97	94
10		97	101	108
11		104		
12				

Přehled hodnot tvrdostí jednotlivých vzorků je uveden v následující tabulce. Průměrná hodnota tvrdosti svaru byla vypočtena z hodnot naměřených 7 mm na každou stranu od středu svaru.

Tabulka 16: Zhodnocení výsledků – HV 0,1

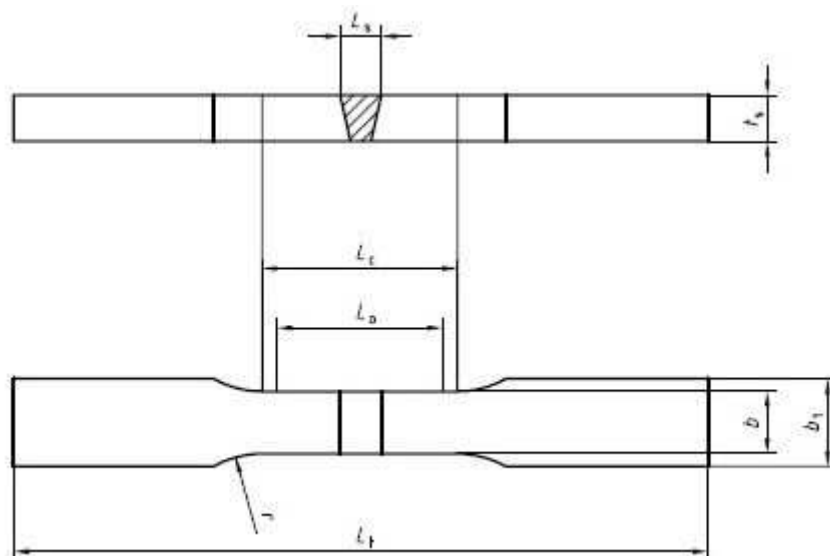
Vzorek	HV 0,1		
	Minimum	Maximum	Průměrná hodnota
FSW 1	64	108	70,7
FSW 2	63	104	69,7
FSW 3	68	102	78,0
FSW 4	69	108	77,7



Obrázek 36: Průběh mikrotvrdosti HV 0,1 – vzorky FSW

6.6 Příčná zkouška tahem

Pro zjištění pevnostních charakteristik svařovaného materiálu je tato zkouška zásadní. Příčná zkouška tahem se provádí a vyhodnocuje podle norem ČSN EN ISO 4136 a ČSN EN ISO 6892-1. Příčné zkoušce tahem byly podrobeny všechny svary svařované jak tavnými, tak i tlakovými způsoby. Vzorky svařené metodami TIG a MIG byly po svařování tepelně zpracovány vytvrzováním. Přesné rozměry a způsob odběru vzorků jsou popsány v normě. Odběr vzorků a příprava zkušebních tyčí musí proběhnout tak, aby nedošlo k ovlivnění jejich vlastností.



Obrázek 37: Tvar zkušební tyče pro plechy [40]

Značka	Termín	Jednotka
b	Šířka rovnoběžné délky	mm
b_1	Šířka hlavy upínacího konce	mm
d	Průměr upevňovacího trnu	mm
D	Vnější průměr trubky ^a	mm
L_c	Rovnoběžná délka	mm
L_o	Počáteční měřená délka	mm
L_s	Maximální šířka svaru po opracování	mm
L_t	Celková délka zkušební tyče	mm
r	Poloměr zaoblení u hlavy	mm
t	Tloušťka svarového spoje	mm
t_s	Tloušťka zkušební tyče	mm
^a Termín „trubka“, samotný nebo v kombinaci, znamená „trubku“, „potrubí“ nebo „dutý profil (bez pravoúhlého průřezu)“.		

Obrázek 38: Vysvětlení použitých symbolů pro zkušební tyč [40]

Tabulka 167: Příčná zkouška tahem – vyhodnocení vzorků

Vzorek	Mez pevnosti [MPa]	Místo porušení	Mez pevnosti [MPa] - Tavba č. 01/0055952/3
TIG - TZ	314	Ve svaru	336 – 341
MIG - TZ	265	Ve svaru	336 – 341
FSW 1	290	Ve svaru	336 – 341
FSW 2	309	Ve svaru	336 – 341
FSW 3	301	Ve svaru	336 – 341
FSW 4	289	Ve svaru	336 – 341

Tahová zkouška proběhla při teplotě 20 °C.

6.7 Zhodnocení dosažených výsledků

Cílem této práce bylo zhodnotit vliv vybraných metod tavného a tlakového svařování na výslednou strukturu svarového spoje vytvrzené hliníkové slitiny EN AW 6082.T6. Primárně se jednalo o posouzení vlivu svařování jednotlivými metodami na pevnostní vlastnosti této slitiny. V této kapitole jsou stručně shrnuty výsledky všech nedestruktivních a destruktivních zkoušek, kterým byly svařené zkušební dílce podrobeny. Bylo svařeno celkem šest zkušebních dílců, po jednom metodou TIG a MIG, další čtyři pak metodou FSW. Jejich přehled, společně s výsledky NDT testů, je uveden v tabulce.

Tabulka 178: Přehled provedených NDT zkoušek

Vzorek	Název zkoušky		
	VT	PT	RT
TIG	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje
MIG	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje
FSW 1	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje
FSW 2	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje
FSW 3	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje
FSW 4	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje

Příčná zkouška tahem a její výsledky jsou pro celou práci stěžejní. Tahová zkouška byla provedena na všech svařovaných vzorcích. U všech vzorků došlo k porušení materiálu

ve svaru. Pro srovnání a úplnost zde uvádím výsledky tahových zkoušek vzorků svařovaných metodami TIG a MIG bez dalšího tepelného zpracování po svařování. Všechny potřebné informace o pevnostních charakteristikách ZM, PM a výsledné hodnoty meze pevnosti jednotlivých vzorků jsou přehledně uvedeny v tabulce 19.

Z teorie je známo, že u vytvrzených slitin hliníku dochází vlivem tavného svařování k poklesu jejich pevnosti. Při zahřátí nad 200 °C začne pevnost postupně klesat, až při teplotě nad 400 °C poklesne na hodnoty vyžíhaného materiálu. K největšímu poklesu dochází v TOO v pásmu přehřátí. Příčinou poklesu pevnosti svarového spoje je postupné rozpouštění precipitátu. Rychlost a rozsah tohoto rozpouštění je ovlivněn teplotou a dobou setrvávání na této teplotě.

Opětovným tepelným zpracováním dílců svařovaných metodami MIG a TIG došlo, při srovnání se svary tepelně nezpracovanými, k prokazatelnému zvýšení meze pevnosti. U vzorku svařeného metodou TIG bylo toto zvýšení výraznější, než u metody MIG. Jelikož byl u každé metody zkoušen pouze jeden vzorek, nelze učinit závěr o větší vhodnosti použití metody TIG oproti metodě MIG. Nevýhodou tepelného zpracování však zůstává jednak jeho časová a finanční náročnost a dále také zvýšené riziko vzniku deformací svařenců.

Druhou zkoumanou možností, jak docílit zachování pevnostních vlastností svařovaného materiálu je použití tlakového způsobu svařování, konkrétně metody FSW. Všechny vzorky vykazovaly poměrně malý pokles meze pevnosti oproti ZM, který činil zhruba 10 %. Z výsledků tahové zkoušky lze vyvozovat, že při zvolených otáčkách nemá rychlost svařování vliv na pevnost svaru. Metoda FSW je vhodná pro svařování tohoto typu slitin. Dosažené výsledky jsou velmi dobré, navíc v porovnání s tavnými způsoby svařování zde není nutné provádět tepelné zpracování svarů. Z tohoto důvodu lze učinit závěr, že svařování vytvrzené slitiny EN AW 6082.T6 metodou FSW je výhodnější, než použití zde uvedených tavných způsobů svařování.

Tabulka 18: Porovnání výsledků tahové zkoušky

Autor		BZS Rail	Vícha
ZM		EN AW 6082	EN AW 6082
PM		OK Autrod 5087	OK Autrod 5087
Materiál		Rm [MPa]	
PM - OK AUTROD 5087		280	
PM - OK TIGROD 5087		280	
EN AW 6082		295	
EN AW 6082 - Tavba č. 01/0055952/3		336 - 341	
Autor	Vzorek	Rm [MPa]	Místo porušení
BZS Rail (vše MIG)	T1	75	Mimo svar
	T2	71	Mimo svar
Vícha (MIG + TIG) 2012	TIG 1.1	85	TOO
	TIG 1.2	88	TOO
	MIG 1.1	84	TOO
	MIG 1.2	84	TOO
Autor	Vzorek	Rm [MPa]	Místo porušení
Vícha (MIG + TIG -TZ) (FSW) 2014	TIG - TZ	314	Ve svaru
	MIG - TZ	265	Ve svaru
	FSW 1	290	Ve svaru
	FSW 2	309	Ve svaru
	FSW 3	301	Ve svaru
	FSW 4	289	Ve svaru

Zkoušky mikrotvrdomosti podle Vickerse HV 0,1 byly provedeny jako doplňkové a realizovány opět pouze u vzorků svařovaných metodou FSW. Měření mikrotvrdomosti bylo prováděno na příčných řezech a vedeno středem zkoušených vzorků skrz všechny oblasti svarového spoje. Zvolená vzdálenost vpichů byla 1 mm. Vzorky vykazovaly v oblasti svaru sníženou tvrdost oproti základnímu materiálu. Toto snížení však nebylo příliš výrazné. Přesné výsledky a průběhy tvrdosti napříč vzorky jsou podrobně uvedeny v kapitole 6.5.

Metalografické zkoušky se prováděly u vzorků svařovaných metodou FSW. Makrostruktura u žádného ze čtyř kontrolovaných vzorků nevykazovala při 7-mi násobném zvětšení výskyt viditelných vad, například trhlin, pórů, vměstků, neprůvarů apod. To dokladuje vhodnost zvolené technologie pro svařování hliníkové slitiny EN AW 6082 a také správnost použitých parametrů. Mikrostruktura byla kontrolována ve svaru v oblasti dynamicky rekrystalizované zóny, tzv. svarového nugetu. Materiál je v této oblasti silně deformován. Má globulitickou strukturu zrna s různým charakterem v oblastech přetváření svařovacím nástrojem. Svarový spoj vykazuje charakter litého/tvářeného materiálu.

Závěr

Diplomová práce byla věnována svařování hliníku a jeho slitin, zejména pak vytvrditelné hliníkové slitině EN AW 6082., která se v praxi poměrně hodně využívá v leteckém a dopravním průmyslu. Cílem práce bylo zhodnocení vlivu zvolených metod tavného a tlakového svařování na vlastnosti této slitiny. Jelikož je znám, v praxi již mnohokrát ověřený, negativní vliv velkého vneseného tepla při svařování těchto typů slitin na jejich pevnostní vlastnosti, byl primárním cílem této práce návrh, provedení a ověření možných postupů, které by vedly k eliminaci tohoto nežádoucího jevu nebo alespoň k jeho potlačení. Pro ověření těchto postupů byly, v souladu se zadáním diplomové práce, zvoleny dvě varianty. První z nich spočívala ve svaření příslušné slitiny nejčastěji používanými metodami tavného svařování hliníkových materiálů TIG a MIG a v jejich následném tepelném zpracování. Druhou variantou bylo využití tlakového způsobu svařování, konkrétně progresivní a velmi perspektivní metody FSW.

Celá práce je rozdělena do šesti základních kapitol. Úvodní kapitola se zabývá hliníkem a jeho slitinami. Jedná se zejména o rozbor jejich mechanických, chemických a fyzikálních vlastností. Je zde také pojednáno o tepelném zpracování hliníkových materiálů. Samostatné kapitoly jsou pak věnovány jejich svařitelnosti se zaměřením na hlavní problémy vznikající při svařování hliníku, jako jsou např. náchylnost na vznik trhlin, pórovitost svarů, přítomnost Al_2O_3 a také pokles pevnostních vlastností vytvrzených slitin. Dále jsou zde uvedeny metody které se pro svařování hliníku používají. Větší pozornosti se dostává poměrně mladé a dynamicky se rozvíjející metodě FSW. Pro praktickou část práce byly vybrány vhodné metody tavného a tlakového svařování. K posouzení vlivu daných svařovacích metod byly zvoleny potřebné metody nedestruktivního a destruktivního zkoušení.

Všechny svarové spoje byly podrobeny vizuální, penetrační a radiografické kontrole. Spoje svařované metodou FSW byly hodnoceny také metalograficky. Bylo provedeno hodnocení makrostruktury, mikrostruktury a měření mikrotvrdosti HV 0,1. Podrobné zhodnocení je uvedeno v kapitole 6.7.

Svařovaná slitina EN AW 6082.T6 je ve vytvrzeném stavu. Při použití tavných způsobů svařování u ní byl prokázán výrazný pokles jejich pevnostních vlastností. Byly proto navrženy a realizovány postupy, které měly za cíl poklesu pevnosti zabránit nebo jej

alespoň omezit. Výsledky tahových zkoušek jednoznačně potvrdily správnost použití tepelného zpracování po svařování metodami TIG a MIG. Velmi dobrých výsledků bylo dosaženo také při použití tlakového svařování metodou FSW. Všechny vzorky svařené touto metodou vykázaly pouze malý, zhruba desetiprocentní pokles pevnosti.

Závěrem je možno zhodnotit použité postupy a metody pro svařování slitiny EN AW 6082 při zvolených parametrech jako vhodné. Z obou použitých metod je možno vyhodnotit metodu FSW jako výhodnější.

Použitá literatura

- [1] KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T., *Svařování I.* skriptu VŠB-TU Ostrava, 2005, 136 s., ISBN 80-248-0870-6
- [2] KOLEKTIV AUTORŮ, *Materiály a jejich svařitelnost.* Ostrava, 2001, ZEROSS, 292 s., ISBN 80-85771-85-3
- [3] KOLEKTIV AUTORŮ, *Technologie svařování a zařízení.* Ostrava, 2001, ZEROSS, 395 s., ISBN 80-85771-81-0
- [4] ORSÁGH, V., ORSÁGH, P., *Zváranie TIG ocelí a neželezných kovov.* Bratislava, 1998, Polygrafia SAV, 300 s., ISBN 80-88780-21-7
- [5] TURŇA, M., *Špeciálne metódy zvárania.* Bratislava, 1989, ALFA, 383 s., ISBN 80-05-00097-9
- [6] MALINA, Z., NÉMA, M., *Základní kurz svařování ZK 141 W 21.* Ostrava, 2004, ZEROSS, 93 s., ISBN 80-86698-02-5
- [7] WIKIPEDIE, *Hliník.* [online]. [cit. 2014-02-18], Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Hlin%C3%ADk>>
- [8] Periodická tabulka, *Hliník.* [online]. [cit. 2014-02-18], Dostupné z: <<http://www.prvky.com/13.html>>
- [9] ČSN EN 573-1, *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – Část 1: Číselné označování.* Praha: Český normalizační institut, červen 2005.
- [10] *Hliník a jeho slitiny.* [online]. [cit. 2014-02-18], Dostupné z: <http://www.benjamin.ic.cz/hlinik_slitiny.pdf>
- [11] TKANÝ, J., *Svařování rozměrných hliníkových svařenců,* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 34s. Vedoucí bakalářské práce Ladislav Daněk
- [12] SKÝBA, P., *Hodnocení koroze u vybraných typů hliníkových slitin pro letecký průmysl,* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 84s. Vedoucí diplomové práce Bohumil Pacal
- [13] SONDEL, M., *Hliník a jeho slitiny.* Prezentace, ČSÚ Ostrava
- [14] VÍCHA, M., *Vliv technologie svařování 141 a 131 na výsledné vlastnosti svarového spoje slitiny EN AW 6082,* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. 72s. Vedoucí bakalářské práce Drahomír Schwarz
- [15] KOLEKTIV AUTORŮ, *Encyklopedie hliníku,* Prešov, 2005, Adin, 700 s., ISBN 80-89041-88-4

- [16] ORSÁGH, V., ORSÁGH, P., *Zváranie MIG ocelí a neželezných kovov*. Bratislava, 1998, Polygrafia SAV, 300 s., ISBN 80-88780-21-7
- [17] ČSN EN 573-2, *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – Část 2: Označování chemickými značkami*. Praha: Český normalizační institut, červen 1996.
- [18] ČSN 42 0055, *Číselné označování těžkých a lehkých neželezných kovů*. Praha: Český normalizační institut, květen 1977
- [19] ŘASA, J., ŠVERCL, J., *Strojnické tabulky 2*, Brno, 2007, SCIENTIA, 586 s., ISBN 978-80-86960-20-3
- [20] ČSN EN 1780-1, *Hliník a slitiny hliníku – Označování slitinových hliníkových ingotů pro přetavení, předslitin a odlitků – Část 1: Číselné označování*. Praha: Český normalizační institut, červen 2003
- [21] AMARI, *Porovnání označení hliníkových slitin podle EN – ČSN – DIN*. [online]. [cit. 2014-02-22], Dostupné z: <
<http://www.amari.at/website/fileadmin/pdf/Porovnan-oznaceni.pdf>>
- [22] KUBÍČEK, J., *Technologie svařování*. Studijní opory pro výuku v kurzech 5TE, VUT Brno
- [23] MIG WELD, *Löslichkeit von Wasserstoff*. [online]. [cit. 2014-02-22], Dostupné z: <
<http://www.migweld.de/service/schweissen-von-aluminium/wasserstoffloeslichkeit.html>>
- [24] KOUTNÝ, J., *Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování*. [online]. [cit. 2014-02-23], Dostupné z: < <http://www.svarbazar.cz/phprs/storage/hlinik.pdf>>
- [25] ČSN EN ISO 6892-1, *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Český normalizační institut, únor 2010
- [26] MINAŘÍK, V., *Plamenové svařování*. Ostrava, 2001, ZEROSS, 130 s., ISBN 80-85771-83-7
- [27] KUBÍČEK, J., *Technologie svařování*. [online]. [cit. 2014-02-26], Dostupné z: <
http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_vyroby_I_svarovani_kubicek.pdf>
- [28] HLAVATÝ, I., *Technologie I*. [online]. [cit. 2014-02-28], Dostupné z: <
http://fs1.vsb.cz/~hla80/Vyuka/2008_Technologie1.pdf>
- [29] SCHWARZ, D., *Plazmové, elektronové a laserové svařování*. Svět svaru 1/2010
- [30] *Označování hliníku a slitiny hliníku podle ČSN EN*. [online]. [cit. 2014-02-28], Dostupné z: < http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/oznacovani_hliniku.pdf>

- [31] STRNADEL, B., *Nauka o materiálu II.* skripta VŠB-TU Ostrava, 2008, 276 s., ISBN 978-80-248-1842-9
- [32] KLIMČÁKOVÁ, K., *Nekonvenční metody svařování tvářených slitin hořčíku*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 91s. Vedoucí diplomové práce Pavel Doležal
- [33] ESAB, *Slitiny hliníku*. [online]. [cit. 2014-03-1], Dostupné z: <<http://products.esab.com/Templates/T094.asp?id=72874>>
- [34] ČSN EN ISO 17637, *Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů*. Praha: Český normalizační institut, srpen 2011
- [35] ČSN EN ISO 10042, *Svařování – Svarové spoje hliníku a jeho slitin zhotovené obloukovým svařováním – Určování stupňů jakosti*. Praha: Český normalizační institut, srpen 2006
- [36] ČSN EN ISO 6520-1, *Svařování a příbuzné procesy – klasifikace geometrických vad kovových materiálů – Část 1: Tavné svařování*. Praha: Český normalizační institut, leden 2008
- [37] ČSN EN ISO 3452-1, *Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 1: Obecné zásady*. Praha: Český normalizační institut, listopad 1998
- [38] ČSN EN ISO 17636-1, *Nedestruktivní zkoušení svarů – Radiografické zkoušení - Část 1: Metody rentgenového a gama záření využívající film*. Praha: Český normalizační institut, září 2013
- [39] ČSN EN 1321, *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha: Český normalizační institut, červenec 1998
- [40] ČSN EN ISO 4136, *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem*. Praha: Český normalizační institut, květen 2013
- [41] *Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.*, 2014, [online]. [cit. 2014-3-20], Dostupné z: <<http://www.vzlu.cz/new/cz/aktivity/specialni-technologie-a-sluzby/technologie-treciho-svarovani-s-promisenim-fsw-friction-stir-welding>>
- [42] TWI, 2014, [online]. [cit. 2014-4-4], Dostupné z: <<http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-for-the-fabrication-of-aluminium-rolling-stock-may-2008/>>
- [43] MRŇA, L., *Metoda FSW, Friction stir welding*. Prezentace. [cit. 2014-4-4], Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__metoda_fsw__mrna.pdf>

- [44] MORAVEC, J., *Speciální metody svařování a pájení. Přednáška č.06*. Technická Univerzita v Liberci, Prezentace, 29 s.
- [45] *iwb*, 2014, [online]. [cit. 2014-4-4], Dostupné z:
<<http://www.iwb.tum.de/Institut+f%C3%BCr+Werkzeugmaschinen+und+Betriebswissenschaften+%28iwb%29.html>>
- [45] *STIRZONE*, 2014, [online]. [cit. 2014-4-4], Dostupné z:
<http://www.stirzone.at/Englisch/technologie_mehr.html>
- [46] MATHERS, G., *The welding of aluminium and its alloys*. Cambridge England, 2011, WOODHEAD PUBLISHING LIMITED, 235 s., ISBN 978-1-85573-567-5
- [47] MANDAL, N. R., *Aluminium welding*. Cambridge England, 2002, WOODHEAD PUBLISHING LIMITED, 147 s., ISBN 1-85573-597-0
- [48] WIKIPEDIE, *Třecí svařování promíšením*. [online]. [cit. 2014-04-5], Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/T%C5%99ec%C3%AD_sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD_prom%C3%AD%C5%A1en%C3%ADm>
- [49] ČSN EN 12517-2, *Nedestruktivní zkoušení svarů – Část 2: Hodnocení svarových spojů u hliníku a jeho slitin při radiografickém zkoušení - Stupně přípustnosti*. Praha: Český normalizační institut, březen 2009
- [50] ČSN EN ISO 9015-2, *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušení tvrdosti – Část 2: Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů*. Praha: Český normalizační institut, červenec 2011

Seznam tabulek

Tabulka 1: Mechanické a fyzikální vlastnosti hliníku Al 99,5 % [2] [8] [6] [4] [15]	13
Tabulka 2: Značení a pevnost základních hliníkových materiálů [2] [21] [30].....	19
Tabulka 3: Součinitel odrazivosti hliníku [3]	40
Tabulka 4: Mechanické vlastnosti slitiny EN AW 6082.T6	51
Tabulka 5: Chemické složení slitiny EN AW 6082.T6	51
Tabulka 6: Typické mechanické vlastnosti čistého svarového kovu	52
Tabulka 7: Typické chemické složení čistého svarového kovu.....	52
Tabulka 8: Parametry svařování - metoda TIG	54
Tabulka 9: Parametry svařování - metoda MIG	55
Tabulka 10: Parametry svařování - metoda FSW	59
Tabulka 11: VT – vyhodnocení vzorků	63
Tabulka 12: PT – vyhodnocení vzorků	64
Tabulka 13: RT – vyhodnocení vzorků	65
Tabulka 14: Zkouška makrostruktury – vyhodnocení vzorků	67
Tabulka 15: Měření mikrotvrdostí jednotlivých vzorků HV 0,1	70
Tabulka 17: Příčná zkouška tahem – vyhodnocení vzorků	73
Tabulka 18: Přehled provedených NDT zkoušek	73
Tabulka 19: Porovnání výsledků tahové zkoušky	75

Seznam obrázků

Obrázek 1: Fázový diagram systému Al – Mg [15].....	15
Obrázek 2: Princip a časový průběh tepelného zpracování vytvrzováním [4]	21
Obrázek 3: Přirozené stárnutí - slitina EN AW 6262 [15].....	22
Obrázek 4: Umělé stárnutí - slitina EN AW 6262 [15]	23
Obrázek 5: Rozpustnost vodíku v hliníku [23].....	25
Obrázek 6: Závislost praskavosti na koncentraci legujícího prvku [2]	26
Obrázek 7: Vliv teploty předehřevu a PM na praskavost slitiny AlMg2 [2].....	27
Obrázek 8: Vliv předchozího ohřevu na tvrdost a pevnost stanovenou při 20 °C u slévárenské slitiny G-AlSi10Mg, která byla před ohřevem ve stavu po umělém stárnutí [15]	29
Obrázek 9: Svařování obalenou elektrodou [28]	30
Obrázek 10: Možnosti zapojení elektrody a vliv na průvar. a) DC – přímá polarita, b) DC – nepřímá polarita, c) AC [24].....	31
Obrázek 11: Složení plynu a jeho vliv na průvar [28].....	33
Obrázek 12: Schéma svařování metodou 141 s přidáváním drátu [28].....	34
Obrázek 13: Tvary konců elektrod po broušení. a) ruční svařování - AC, b) ruční svařování - DC, c) strojní svařování – DC [3].....	35
Obrázek 14: Princip svařování metodou MIG [28]	36
Obrázek 15: Princip svařování metodou FSW [46].....	44
Obrázek 16: Svar zhotovený metodou FSW. DXZ - zcela zrekrystalizovaná oblast tzv. svarový nuget, TMAZ - termomechanicky ovlivněná oblast, HAZ - tepelně ovlivněná oblast, A - neovlivněný materiál. [48]	45
Obrázek 17: Příklady tvarů hrotu (a) a ramene (b) [32]	46
Obrázek 18: Svařitelnost kovů, jejich slitin a vzájemných kombinací metodou FSW [44]	47
Obrázek 19: Úprava svarových ploch – svařování MIG	53
Obrázek 20: Úprava svarových ploch – svařování TIG	53
Obrázek 21: Použitý svařovací nástroj	57
Obrázek 22: Upnutí svařovaných dílů v přípravku.....	58
Obrázek 23: Ukázky povrchů zkušebních vzorků č. 1-4 svařovaných při 600 ot./min.....	60
Obrázek 24: Ukázky povrchů zkušebních vzorků č. 5-7 svařovaných při 800 ot./min.....	60
Obrázek 25: Přímá vizuální kontrola. Značka a znázorňuje povolený rozsah úhlu pozorování. [34]	62
Obrázek 26: Víceúčelová měrka Cambridge	62

Obrázek 27: Princip radiografické kontroly, S – zdroj záření, F – film, b – vzdálenost objekt-film, t – jmenovitá tloušťka, f – vzdálenost zdroj-objekt	64
Obrázek 28: Makrostruktura svarového spoje, vzorek FSW1	66
Obrázek 29: Makrostruktura svarového spoje, vzorek FSW2	66
Obrázek 30: Makrostruktura svarového spoje, vzorek FSW3	66
Obrázek 31: Makrostruktura svarového spoje, vzorek FSW4	66
Obrázek 32: Mikrostruktura vzorku FSW 1 – oblast svarového nugetu	67
Obrázek 33: Mikrostruktura vzorku FSW 2 – oblast svarového nugetu	68
Obrázek 34: Mikrostruktura vzorku FSW 3 – oblast svarového nugetu	68
Obrázek 35: Mikrostruktura vzorku FSW 4 – oblast svarového nugetu	69
Obrázek 36: Průběh mikrotvrdosti HV 0,1 – vzorky FSW	71
Obrázek 37: Tvar zkušební tyče pro plechy [40]	72
Obrázek 38: Vysvětlení použitých symbolů pro zkušební tyč [40]	72

Přílohy

Příloha 1	– Inspection certificate (Atest materiálu EN AW-6082 T6)
Příloha 2	– Protokol (příčná zkouška tahem)
Příloha 3	– Protokol o zkoušce VT (TIG)
Příloha 4	– Protokol o zkoušce VT (MIG)
Příloha 5	– Protokol o zkoušce VT (FSW)
Příloha 6	– Protokol o zkoušce RT (TIG)
Příloha 7	– Protokol o zkoušce RT (MIG)
Příloha 8	– Protokol o zkoušce RT (FSW)
Příloha 9	– Protokol o zkoušce PT (MIG)
Příloha 10	– Protokol o zkoušce PT (FSW)
Příloha 11	– Protokol o zkoušce PT (FSW)
Příloha 12	– WPS (TIG)
Příloha 13	– WPS (MIG)